



TUGAS AKHIR - TE 141599

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA *PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEHICLE* (PHEV) MENGGUNAKAN METODE PI-ROBUST

Sentosa Sondang Oktovius
NRP 2211100211

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Ir. Ali Fatoni, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**SPEED CONTROL DC MOTOR IN PARALLEL HYBRID
ELECTRIC VEHICLE (PHEV) USING PI-ROBUST
METHOD**

Sentosa Sondang Oktovius
NRP 2211100211

ADVISORS

Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Ir. Ali Fatoni, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA *PARALLEL*
HYBRID ELECTRIC VEHICLE (PHEV) MENGGUNAKAN
METODE PI-ROBUST**

TUGAS AKHIR


**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,


Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
NIP. 195704241985021001


Ir. Ali Fatoni, M.T.
NIP. 196206031989031002



**SURABAYA
JULI, 2015**

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEHICLE (PHEV) MENGUNAKAN METODE PI-ROBUST

Nama : Sentosa Sondang Oktovius
Pembimbing I : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Pembimbing II : Ir. Ali Fatoni, M.T.

ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar minyak saat ini semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kendaraan bermotor. Bahan bakar minyak adalah salah satu sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, hal ini menyebabkan terjadinya krisis energi di dunia. Selain tidak dapat diperbaharui, penggunaan bahan bakar minyak juga menimbulkan polusi yang dapat menyebabkan *global warming*. Keadaan polusi yang semakin meningkat selain menyebabkan *global warming* juga berpengaruh pada kesehatan manusia.

Saat ini, menghentikan penggunaan bahan bakar minyak untuk kendaraan masih tidak mungkin dilakukan mengingat banyaknya kendaraan yang masih menggunakan bahan bakar minyak. Dalam upaya mengurangi penggunaan bahan bakar minyak, maka diciptakan sebuah alternatif kendaraan yang hemat energi dan ramah lingkungan. Alternatif tersebut adalah *hybrid electric vehicle* (HEV). HEV adalah sebuah kendaraan yang memiliki dua mesin penggerak, yaitu ICE atau mesin pembakaran dalam dan motor listrik.

Kontroler PI-Robust digunakan untuk mengatur motor DC sebagai regulator dalam membantu ICE pada kondisi pembebanan untuk tetap mempertahankan *setpoint*. Berdasarkan hasil percobaan, motor DC dapat menjalankan perannya sebagai regulator untuk membantu ICE dalam mempertahankan *setpoint* bahkan saat pembebanan maksimal saat arus rem elektromagnetik sebesar 1.14A. Sehingga dapat disimpulkan kontroler PI-Robust dapat membantu ICE dalam mempertahankan kecepatan di *setpoint* yang diberikan pada saat kondisi pembebanan.

Kata kunci : HEV, motor DC, PI-Robust, regulator

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

Speed Control DC Motor in Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Using PI-Robust Method

Name : Sentosa Sondang Oktovius
1st Advisor : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
2nd Advisor : Ir. Ali Fatoni, M.T.

ABSTRACT

The use of fossil fuels is increasing with the increase of motor vehicles. Fuel oil is one of the natural resources that can not be renewed, this causes the energy crisis in the world. In addition to non-renewable, fossil fuel use also cause pollution that can lead to global warming. State besides increasing pollution causes global warming also affect human health

At present, discontinue the use of fuel for the vehicle is still not possible considering the number of vehicles that still use fuel oil. In an effort to reduce the use of fossil fuels, then created an alternative energy-efficient vehicles and environmentally friendly. The alternative is a hybrid electric vehicle (HEV). HEV is a vehicle that has two propulsion engines, namely ICE or the Internal Combustion Engine and electric motor

PI-Robust controller is used to adjust the DC motor as a regulator in helping ICE on loading conditions to maintain the setpoint. Based on the experimental results, the DC motor can perform its role as a regulator to help ICE to maintain setpoint even when the maximum load current of 1.14A current electromagnetic brake. It can be concluded PI-Robust controller can assist ICE in maintaining a given speed setpoint at the time of loading conditions

Keywords: HEV, DC motors, PI-Robust, regulator

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan nikmat-Nya sehingga Laporan Tugas Akhir penulis pada yang berjudul : "Pengaturan Kecepatan Motor DC pada *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) Menggunakan Metode PI-Robust" dapat terselesaikan. Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan laporan ini, diantaranya kepada :

1. Kedua orang tua penulis yang selalu memberi dukungan dalam tiap hal
2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T. selaku Dosen Pembimbing I
3. Ir. Ali Fatoni, M.T. selaku Dosen Pembimbing II
4. Rekan satu tim penulis, Ajib Setiawan N., Fanniesha H., Alif Ridwan M, Mba Aulia Rahma A, dan Mas Fahrul
5. Angkatan e-51 yang telah memberi dukungan moril
6. Dan semua pihak yang telah membantu penulis dalam pelaksanaan Tugas Akhir dan pembuatan laporan ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi yang baik dan bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, 1 Juli 2015

Penulis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

TABLE OF CONTENT

<i>STATEMENT OF AUTHENTICITY</i>	<i>iii</i>
<i>FINAL PROJECT</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>ix</i>
<i>PREFACE</i>	<i>xi</i>
<i>TABLE OF CONTENT</i>	<i>xiii</i>
<i>LIST OF FIGURE</i>	<i>xv</i>
<i>LIST OF TABLE</i>	<i>xvii</i>
BAB I INTRODUCTION	1
1.1 Background.....	1
1.2 Problem.....	1
1.3 Research Objective	2
1.4 Problem Constrains.....	2
1.5 Writing Methodology	2
1.5.1 Study of Literature	2
1.5.2 Sytem Design	2
1.5.3 Testing and Analysis	3
1.5.4 Conclusions and Recommendations.....	3
1.5.5 Structuring of Final Project.....	4
1.6 Writing Systematic.....	4
1.7 Relevance	4
BAB II LITERATURE REVIEWS	7
2.1 Hybrid Electric Vehicle (HEV).....	7
2.2 Internal Combustion Engine (ICE).....	8
2.3 Electric Motor	10
2.4 Proportional Intergral Controller (PI)	15
2.5 Bode Diagram	16
2.5.1 Gain K	16
2.5.2 Factors Integral dan Derivative $(j\omega)^{\pm 1}$	17
2.5.3 First Order Factor $(1+j\omega T)^{\pm 1}$	18
2.5.4 Second Order Factor $[1 + 2\xi(j\omega/\omega) + (j\omega/\omega)^2]^{\pm 1}$	20
2.6 Compensator	21
BAB III SYSTEM DESIGN	25
3.1. Design of Hybrid Electric Vehicle (HEV) Simulator.....	25
3.1.1 Design of Mechanincal Components.....	25

3.1.2	<i>Design of Electronic Components.....</i>	31
3.2.	<i>Software Design.....</i>	33
3.3.	<i>Identification and Modeling System.....</i>	36
3.3.1	<i>Parameters of DC Motor.....</i>	37
3.3.2	<i>Parameters of Load.....</i>	41
3.3.3	<i>Parameter of Internal Combustion Engine.....</i>	43
3.4	<i>Reference Model.....</i>	48
3.5	<i>PI Controller Design.....</i>	49
3.6	<i>Robust Compensator Design</i>	50
 BAB IV TESTING AND ANALYSIS		57
4.1.	<i>Testing System Overview.....</i>	57
4.2.	<i>System Simulation.....</i>	57
4.2.1	<i>Simulation of ICE Nominal Load Condition Without DC Motor.....</i>	57
4.2.2	<i>Simulation of ICE Nominal Load Condition With DC Motor Using PI-Robust Method</i>	59
4.2.3	<i>Comparison of PI-Robust Controller and PI Controller When Initial Load Condition</i>	62
 BAB V CONCLUSION AND SUGGETION.....		65
5.1	<i>Conclusion.....</i>	65
5.2	<i>Suggestion</i>	65
 BIBLIOGRAPHY		67
APPENDIX.....		69
BIOGRAPHY.....		73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi ICE.....	26
Tabel 3.2 Spesifikasi Motor DC	27
Tabel 3.3 Perbandingan Kecepatan untuk Diolah Labview dengan Kecepatan Asli (dalam RPM).....	35
Tabel 3.4 Data Percobaan Konstanta Balik Motor DC.....	38
Tabel 3.5 Data Percobaan Kondisi Maksimun dan Nominal.....	39
Tabel 3.6 Data Percobaan Pencarian Nilai $\Delta\tau_{mdc}$	40
Tabel 3.7 Induktansi dan Resistansi Motor DC	41
Tabel 3.8 Parameter Identifikasi Metode Strejc.....	44

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konsep dan aliran kerja kendaraan <i>hybrid</i>	7
Gambar 2.2 Konfigurasi pada HEV	8
Gambar 2.3 Langkah Kerja Motor Bensin Empat Langkah	10
Gambar 2.4 Prinsip Kerja Motor DC	12
Gambar 2.5 Konstruksi Motor DC	13
Gambar 2.6 Jenis-Jenis Motor DC	14
Gambar 2.7 Karakteristik Kecepatan dan Torsi Motor DC	15
Gambar 2.8 Diagram blok kontroler PI	16
Gambar 2.9 Garis konversi bilangan-dB	17
Gambar 2.10 Kurva respon frekuensi untuk $1/j\omega$ dan $j\omega$	18
Gambar 2.11 Faktor orde pertama $(1+j\omega T)^{\pm 1}$	19
Gambar 2.12 Magnitud-log dan sudut fase faktor kuadrat	21
Gambar 3.1 Simulator <i>Hybrid Electric Vehicle</i>	25
Gambar 3.2 Bentuk fisik ICE pada simulator HEV	26
Gambar 3.3 Bentuk fisik Motor DC	27
Gambar 3.4 Rem Elektromagnetik Simulator HEV	28
Gambar 3.5 Gear penghubung simulator HEV	30
Gambar 3.6 Pedal gas dan potensiometer	31
Gambar 3.7 Bentuk fisik optocoupler	31
Gambar 3.8 Rangkaian Optocoupler	32
Gambar 3.9 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh	32
Gambar 3.10 Tampilan software arduino	34
Gambar 3.11 LabView	36
Gambar 3.12 Blok Diagram Simulator HEV	36
Gambar 3.13 Diagram Blok Motor DC	37
Gambar 3.14 Motor DC saat Diberikan <i>Input Sinyal Step</i>	42
Gambar 3.15 Respon ICE Pembebanan Nominal	43
Gambar 3.16 Respon ICE Pembebanan Nominal	45
Gambar 3.17 Respon ICE Pembebanan Maksimal	47
Gambar 3.18 Blok Diagram Motor DC Hasil Linearisasi	52
Gambar 3.19 Diagram bode G_c	54
Gambar 3.20 Diagram bode G_c dan K	55
Gambar 3.21 Diagram bode G_c dan K dengan range dB diperbesar	55
Gambar 3.22 Diagram blok PI-Robust	56
Gambar 4.1 Respon ICE dan beban pada arus beban 0,7 A	58

Gambar 4.2 Respon ICE dan beban pada arus beban 0,9A	58
Gambar 4.3 Respon ICE dan beban pada arus beban 1,14A	59
Gambar 4.4 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 0,7A.....	60
Gambar 4.5 Sinyal kontrol pada arus beban 0,7A.....	60
Gambar 4.6 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 0,9A.....	61
Gambar 4.7 Sinyal kontrol pada arus beban 0,9A.....	61
Gambar 4.8 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 1,14A.....	62
Gambar 4.9 Sinyal kontrol pada arus beban 1,14 A.....	62
Gambar 4.10 Perbandingan kontroler pada arus beban 0,7 A.....	63
Gambar 4.11 Perbandingan kontroler pada arus beban 0,9 A.....	64
Gambar 4.12 Perbandingan kontroler pada arus beban 1,14 A.....	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan bahan bakar minyak untuk kendaraan motor yang meningkat menyebabkan berkurangnya stok bahan bakar minyak, dimana bahan bakar minyak termasuk sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui. Dalam upaya menanggulangi krisis energi maka diciptakan suatu kendaraan hemat energi yang disebut *Hybrid Electric Vehicle (HEV)*. HEV merupakan suatu kendaraan yang menggunakan *Internal Combustion Engine (ICE)* dan motor listrik sebagai penggerakannya. Pada proses akselerasi, ICE membutuhkan bantuan dari motor listrik untuk mempercepat tercapainya akselerasi sesuai dengan *set point* yang diinginkan.

Berdasarkan konfigurasinya, HEV dibagi menjadi tiga kategori yaitu : konfigurasi seri, konfigurasi paralel, dan konfigurasi seri-paralel. Pada konfigurasi seri, motor listrik berfungsi penuh sebagai penggerak HEV. Energi yang dihasilkan oleh mesin bahan bakar dikonversikan menjadi energi listrik. Pada konfigurasi paralel, dua sumber energi menggerakkan HEV secara bergantian maupun secara bersamaan. Sedangkan pada konfigurasi seri-paralel, yaitu mengombinasikan keduanya dimana mesin bahan bakar dapat berfungsi sebagai penggerak HEV dan dapat juga berfungsi sebagai sumber energi bagi motor listrik.

Kontroler PI adalah kontroler yang umum digunakan untuk pengontrolan industri proses. Kontroler ini sangat banyak digunakan di industri *plant* dan kebanyakan kontroler ini sangat efektif. Kontroler ini sering menjadi pilihan bagi kebanyakan lup pengontrolan.

Kompensator robust akan menjadi metode pendukung untuk kontroler PI dalam penelitian tugas akhir ini dimana kompensator akan didesain untuk mengurangi efek pembebanan pada saat PHEV mencapai suatu kecepatan. Lebih detailnya kompensator robust akan mengurangi sinyal eror yang terjadi agar PHEV dapat mempertahankan kecepatan putar pada kecepatan yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Performa PHEV pada saat mempertahankan kecepatan pada kondisi pembebanan masih harus ditingkatkan. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu kompensator pada sistem kontrol PHEV sehingga mampu mengurangi

efek dari pembebanan. Dimana pada saat akselerasi diberikan efek pembebanan maka motor DC akan mampu membantu kinerja dari ICE agar sistem PHEV mampu mempertahankan kecepatan yang diinginkan.

1.3 Tujuan Pelaksanaan

Dengan digunakannya kompesator robust pada sistem kontrol PHEV, diharapkan motor DC dapat membantu akselerasi pada ICE untuk mempertahankan kecepatan pada saat kondisi pembebanan. Hal ini dapat dicapai karena kompensator robust memiliki kemampuan untuk mengakumulasi nilai *error* dengan nilai *set-point* yang diinginkan. Dengan adanya kompensator robust ini diharapkan ICE tidak perlu menggunakan bahan bakar yang berlebih untuk mempertahankan kecepatan pada saat kondisi pembebanan.

1.4 Batasan Masalah

Permasalahan pada Tugas Akhir ini dibatasi oleh beberapa hal, antara lain:

- a. ICE dioperasikan secara manual dengan menekan pedal gas sebagai masukan pada ICE
- b. Motor DC mendapat tegangan dari *auto trafo* sehingga tidak ada mekanisme *charging* dan *discharging*

1.5 Metodologi Penulisan

1.5.1 Studi Literatur

Tahapan ini bertujuan untuk pengumpulan dan pengkajian terhadap topik tugas akhir yang diusulkan. Dapat berasal dari teori- teori dasar, acuan secara umum dan khusus serta memperoleh berbagai informasi pendukung lainnya terkait topik tugas akhir yang diusulkan yang dapat berasal dari buku, jurnal, artikel, dan pendapat para ahli.

1.5.2 Perancangan Sistem

Tahapan ini bertujuan untuk merancang keseluruhan sistem yang akan digunakan dalam topik tugas akhir yang diusulkan. Tahap perancangan sistem terbagi menjadi empat tahapan, antara lain :

a. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras disini adalah perancangan komponen pendukung simulator PHEV. Dimana *plant* sudah tersedia maka perancangan yang dimaksud berupa komponen mekanik pendukung dan perancangan komponen elektronik. Pada tahap ini juga dilakukan pengecekan komponen mekanik dan elektronik, apabila kondisi dari komponen mekanik dan

elektronik kurang berfungsi maka akan dilakukan penggantian komponen.

b. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak yang dimaksud adalah perancangan program yang akan digunakan untuk menjalankan sistem. Pada tahapan ini program *labview* dan *matlab* akan dirancang untuk proses identifikasi dan permodelan sistem serta untuk pengujian simulasi sistem. Dan juga akan dirancang program pada *arduino* sebagai koneksi antara program perangkat lunak dan simulator PHEV.

c. Identifikasi dan Permodelan Sistem

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan model matematika sistem dan juga identifikasi parameter-parameter yang terdapat pada sistem yang akan diteliti pada topik tugas akhir yang diajukan.

d. Perancangan Kontroler

Tahapan ini adalah tahapan perancangan kontroler yang digunakan untuk mengatur kecepatan simulator PHEV. Metode yang digunakan untuk perancangan kontroler adalah PI-Robust.

1.5.3 Pengujian dan Analisis

Tahapan ini bertujuan untuk menguji sistem yang telah dibuat serta menganalisa respon yang dihasilkan dari pengujian tersebut. Tahap ini adalah pengujian terhadap sistem secara simulasi yang akan dilakukan menggunakan *software matlab*. Dari hasil simulasi akan dianalisa kesesuaian respon yang dihasilkan dengan karakteristik respon sistem yang diinginkan. Dan juga pada tahap ini dilakukan perbandingan respon motor DC dengan kontroler PI-Robust dan respon motor DC dengan kontroler PI

1.5.4 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Tahap penarikan kesimpulan mengacu pada data pengujian, analisis data, dan referensi terkait. Kesimpulan menunjukkan hasil kerja sesuai rumusan masalah yang telah dibuat. Selanjutnya, penarikan saran juga dilakukan sebagai bentuk koreksi terhadap penelitian yang telah dilakukan dan pengembangan penelitian selanjutnya terkait topik serupa.

1.5.5 Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Tahap ini merupakan tahap akhir dari serangkaian pelaksanaan tugas akhir. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil kerja terkait topik yang diusulkan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan hasil Tugas Akhir ini terbagi atas enam yang tersusun seperti berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang, tujuan pelaksanaan, batasan masalah, metodologi penulisan, serta sistematika penulisan buku tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang penjelasan mengenai *hybrid electric vehicle* (HEV), *Internal Combustion Engine* (ICE), motor DC, kontroler proporsional dan interal, diagram bode, dan kompensator

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisikan proses perancangan komponen pendukung simulator *hybrid electric vehicle*. perancangan komponen pendukung simulator *hybrid electric vehicle* terdiri dari perancangan komponen mekanik dan perancangan komponen elektronik. Dalam bab ini juga dijelaskan mengenai perancangan kontroler yang akan digunakan untuk tugas akhir.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini berisikan analisa hasil pengujian tentang penggunaan kontroler yang sudah dirancang untuk motor DC dan juga analisa mengenai perbandingan respon antara motor DC dengan kontroler PI-Robust dan motor DC dengan kontroler PI

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran dari pembahasan yang telah dipaparkan pada laporan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan tugas akhir diharapkan dapat memberikan manfaat, antara lain :

1. Dapat dijadikan acuan dalam pembuatan sistem pengaturan kecepatan *hybrid electric vehicle*.

2. Dapat dijadikan acuan dalam menentukan kontroler yang tepat sesuai dengan kondisi pembebanan.
3. Dapat dijadikan bahan penelitian lebih lanjut untuk membantu perkembangan *hybrid electric vehicle*.

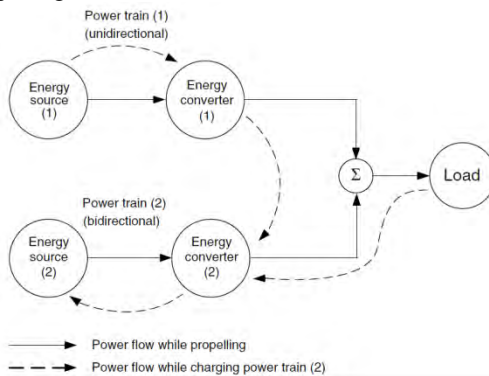
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Hybrid Electric Vehicle (HEV)*[1][2]

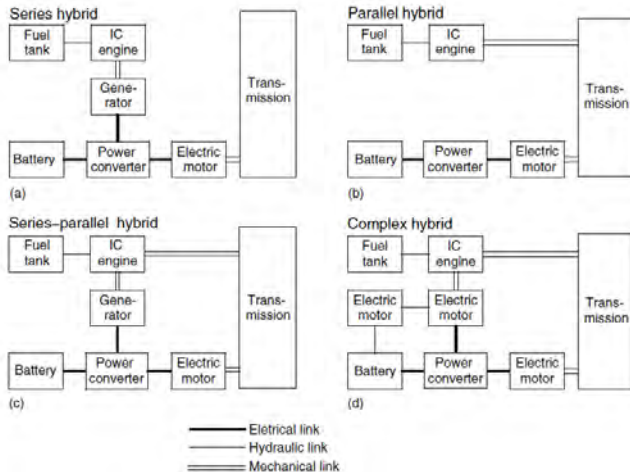
HEV adalah sebuah kendaraan yang menggabungkan sistem daya gerak mesin pembakaran dalam konvensional dengan sistem daya gerak listrik. HEV memiliki dua mesin penggerak, yaitu ICE atau mesin pembakaran internal dan motor listrik. Kendaraan dengan mesin pembakaran dalam mempunyai keuntungan dalam performa, namun memiliki kekurangan dalam konsumsi bahan bakar. Hal ini menyebabkan kendaraan dengan mesin pembakaran dalam lebih banyak mengeluarkan biaya dalam penggunaan bahan bakar dan juga menghasilkan polusi dalam penggunaannya. Kendaraan dengan tenaga listrik memiliki keuntungan dalam hal pengeluaran biaya dalam konsumsi bahan bakar dan juga ramah lingkungan, akan tetapi performa dari kendaraan listrik tidak sebaik performa kendaraan dengan sistem pembakaran dalam. Oleh karena itu, diciptakan HEV yang memanfaatkan kedua mesin penggerak. Konsep kerja kendaraan *hybrid* dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Konsep dan aliran kerja kendaraan *hybrid*

Berdasarkan arsitektur mekanik, HEV dibagi menjadi empat kategori, yaitu : konfigurasi seri, konfigurasi paralel, konfigurasi seri-paralel dan konfigurasi kompleks. Pada konfigurasi seri, motor listrik berfungsi penuh sebagai penggerak HEV. Tenaga gerak dari mesin

bakar lalu diubah ke dalam listrik oleh generator listrik. Sehingga efisiensi sangat bergantung pada efisiensi generator dan motor listrik yang digunakan. Pada konfigurasi paralel, dua sumber energy bisa menggerakkan HEV secara bergantian maupun secara bersamaan. Sedangkan pada konfigurasi seri-paralel mengkombinasikan keduanya dimana mesin bakar dapat berfungsi sebagai penggerak HEV dan dapat juga berfungsi sebagai sumber energi bagi motor listrik. Konfigurasi kompleks menggunakan tiga buah motor listrik pada sistemnya. Motor listrik pertama untuk mengisi baterai, motor listrik kedua sebagai penghubung mesin ICE dalam membantu motor listrik menggerakkan kendaraan, dan yang terakhir motor listrik untuk menggerakkan kendaraan. Beberapa tipe konfigurasi HEV dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Konfigurasi pada HEV

2.2 Internal Combustion Engine (ICE)[3]

Internal Combustion Engine (ICE) atau mesin pembakaran dalam adalah mesin konversi energi yang merubah energi kimia atau panas menjadi energi mekanik atau energi gerak. Dalam struktur konfigurasi HEV biasanya menggunakan ICE jenis motor bensin sebagai salah satu mesin penggerakannya. Di dalam motor bensin terdapat sebuah piston atau torak yang berfungsi merubah energi kimia atau panas menjadi energi mekanik yang kemudian diteruskan ke bagian-bagian mesin yang lain. Dalam motor bensin bahan bakar yang bercampur udara dimasukkan

melalui sebuah saluran ke dalam silinder kemudian dibakar dari percikan bunga api yang dihasilkan oleh busi. Saat terjadi pembakaran, torak akan bergerak turun dan menggerakkan engkol dan memutar poros engkol. Selain disebut sebagai ICE motor bensin juga disebut sebagai *spark plug Ignition Engine* karena motor bensin sistem penyalanya menggunakan busi atau *Spark Plug*.

Pada awalnya bahan bakar di udara dicampurkan lebih dulu oleh karburator, setelah itu campuran bahan bakar dan udara tadi dihisap oleh gerakan naik turun torak ke dalam ruang bakar atau ke dalam silinder melalui saluran masuk yang terbuka. Setelah bahan bakar masuk ke dalam silinder saluran masuk menutup sehingga campuran udara dan bahan bakar tadi tertahan di dalam silinder. Saat torak naik keatas tepatnya ke titik tertinggi dimana torak bergerak ke atas atau yang biasa disebut dengan Titik Mati Atas (TMA) campuran udara dan bahan bakar tadi termampatkan (terkompresi). Saat terjadi kompresi dan torak berada di TMA maka akan terjadi loncatan bunga api yang dihasilkan oleh busi yang mengakibatkan terjadinya peristiwa pembakaran dan membuat torak bergerak turun bebas ke titik paling bawah atau yang biasa disebut Titik Mati Bawah (TMB). Setelah itu torak kembali naik dan mendorong gas bekas atau gas sisa dari proses pembakaran tadi keluar melalui saluran pengeluaran, proses akan kembali lagi dari penghisapan campuran bahan bakar dan udara ke dalam silinder. Gerakan naik-turun tirak secara bebas di rubah menjadi gerakan putar oleh poros engkol melalui batang torak. Dari gerakan putar tadi itulah akan disalurkan ke bagian-bagian motor yang lain sehingga motor tersebut bisa menggerakkan sebuah kendaraan.

Motor bensin terbagi menjadi dua jenis, yaitu motor bensin dua langkah (*two stroke*) dan empat langkah (*four stroke*). Motor bensin dua langkah adalah motor yang pada dua langkah piston (satu putaran engkol) sempurna akan menghasilkan satu tenaga. Berikut adalah proses kerja dari motor bensin dua tak.

- a. Pada keadaan motor posisi TMB ke TMA, dimulai dengan piston bergerak dari TMB ke TMA bersamaan dengan terbukanya lubang aluran masuk maka gas dari karburator terhisap masuk ke dalam carter atau ruang kruk as. Gas yang ada diatas piston akan di komperesi atau dimampatkan. Pada saat piston mencapai TMA, busi melontarkan bunga api listiknya dengan tegangan yang tinggi untuk membakar gas yang telah dikompresi.

- b. Pada keadaan motor posisi TMA ke TMB, dimulai dengan piston bergerak dari TMA ke TMB, lalu gas yang berada di dalam silinder yang telah dibakar akan berusaha mengembang lalu mendorong piston dengan disertai tenaga tekanan lalu kemudian tekanan tersebut akan disimpan dan dirubah oleh kruk as menjadi tenaga motor. Gas di dalam carter akan di kompresi sehingga sering disebut dengan kompresi carter. Lalu lubang saluran dibuka keluar terbuka oleh piston dan gas sisa pembakaran dengan sendirinya akan keluar melalui saluran buang dari dalam silinder yang langsung ke knalpot. Pada waktu saluran buang terbuka oleh piston, gas yang telah di kompresi di dalam carter akan berusaha naik ke atas piston untuk membersihkan sisa pembakaran gas yang masih tertinggal di dalam silinder sekaligus gas baru tersebut menempati ruangan silinder untuk kemudian dibakar dan terjadi terus menerus selama mesin dalam keadaan hidup seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.3.



Gambar 2.3 Langkah Kerja Motor Bensin Dua Langkah

2.3 Motor Listrik[4]

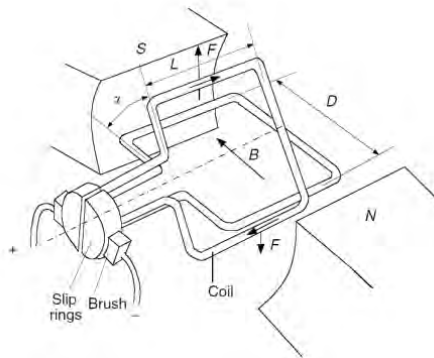
Motor listrik merupakan suatu perangkat yang dapat mengubah energy listrik menjadi mekanik. Berdasarkan sumber yang dibutuhkan, motor listrik dibagi menjadi dua yaitu motor listrik AC dan motor listrik

DC. Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Motor arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/direct-unidirectional.

Sebuah motor DC magnet permanen biasanya tersusun atas magnet permanen, kumparan jangkar, dan sikat (*brush*). Medan magnet yang besarnya konstan dihasilkan oleh magnet permanen, sedangkan komutator dan sikat berfungsi untuk menyalurkan arus listrik dari sumber di luar motor ke dalam kumparan jangkar. Letak sikat sepanjang sumbu netral dari komutator, yaitu sumbu dimana medan listrik yang dihasilkan bernilai nol. Hal ini dimaksudkan agar pada proses perpindahan dari sikat ke komutator tidak terjadi percikan api.

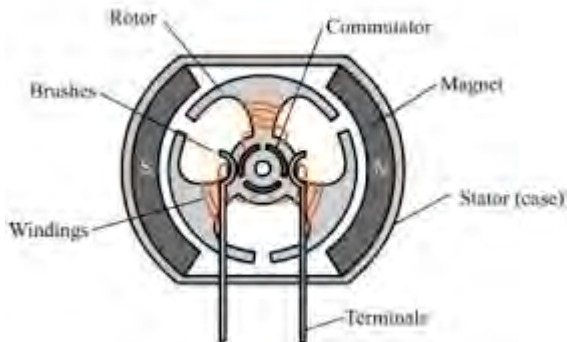
Medan stator memproduksi fluks Φ dari kutub U ke kutub S . Sikat – arang menyentuh terminal kumparan rotor di bawah kutub. Bila sikat – arang dihubungkan pada satu sumber arus searah di luar dengan tegangan V , maka satu arus I masuk ke terminal kumparan rotor di bawah kutub U dan keluar dari terminal di bawah kutub S . Dengan adanya fluks stator dan arus rotor akan menghasilkan satu gaya F bekerja pada kumparan yang dikenal dengan gaya Lorentz.

Arah F menghasilkan torsi yang memutar rotor ke arah yang berlawanan dengan jarum jam. Kumparan yang membawa arus bergerak menjauhi sikat – arang dan dilepas dari sumber suplai luar. Kumparan berikutnya bergerak di bawah sikat – arang dan membawa arus I . Dengan demikian, gaya F terus menerus diproduksi sehingga rotor berputar secara kontinyu seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Motor DC

Komponen motor DC terdiri dari tiga komponen, yaitu : kutub medan, rotor, dan komutator. Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Garis magnetic energi membesar melintasi bukaan di antara kutub – kutub dari utara menuju selatan. Untuk motor yang lebih besar atau lebih kompleks, terdapat satu atau lebih elektromagnet. Elektromagnet menerima listrik dari sumber daya luar sebagai penyedia struktur medan. Rotor yang berbentuk silinder, dihubungkan ke as penggerak untuk menggerakkan beban. Untuk motor DC yang kecil, rotor berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub – kutub, sampai kutub utara dan kutub selatan magnet berganti lokasi. Jika hal ini terjadi, arus berbalik untuk merubah kutub – kutub utara dan selatan rotor. Komutator yang terdapat pada motor DC berfungsi untuk membalikkan arah arus listrik dalam kumparan jangkar. Komutator juga membantu dalam transmisi arus antara kumparan jangkar dan saluran daya. Konstruksi motor DC dapat dilihat pada gambar 2.5.



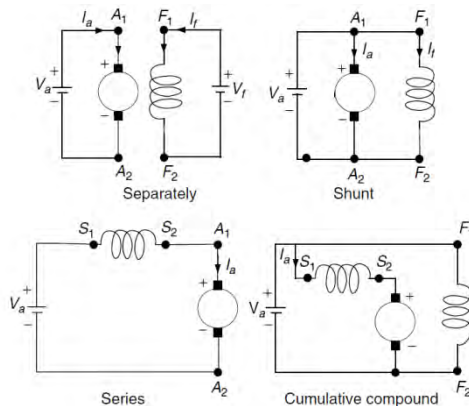
Gambar 2.5 Konstruksi Motor DC

Berdasarkan penguatannya, motor arus searah dapat diklasifikasikan menjadi motor DC penguatan terpisah dan penguatan sendiri (*self excited*). Motor – motor pada masing – masing kelompok memiliki karakteristik kecepatan – torsi yang berbeda. Rangkaian karakteristik motor DC dapat dilihat pada gambar 2.6.

- a. Motor DC magnet permanen. Berupa kumparan medan magnet permanen sehingga medan magnet yang dihasilkan berupa fluks magnetik konstan. Oleh karena fluks magnetik konstan, maka arus medan yang dihasilkan juga konstan
- b. Motor DC penguat terpisah. Kumparan medandibentuk dari sejumlah besar kumparan dengan penampang kawat yang kecil. Kumparan medan tipe ini dirancang untuk tahan bekerja dengan tegangan nominal motor. Arus medan dan arus jangkar dipasok dari sumber yang berbeda.
- c. Motor DC *shunt* / parallel. Kumparan medan sama seperti pada penguat terpisah, tetapi kumparan medan terhubung secara paralel dengan rangkaian rotor. Satu sumber yang sama digunakan untuk menyuplai kumparan medan dan rotor. Oleh karena itu, total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus jangkar. Kecepatan motor DC jenis ini pada prakteknya konstan, tidak tergantung pada beban (hingga torsi tertentu setelah kecepatannya berkurang).
- d. Motor DC seri. Kumparan medan dihubungkan secara seri dengan kumparan jangkar. Oleh karena itu, arus medan sama dengan arus jangkar. Pada saat kondisi awal, arus starting pada motor DC jenis ini akan sangat besar. Untuk itu, pada saat menjalankan motor harus

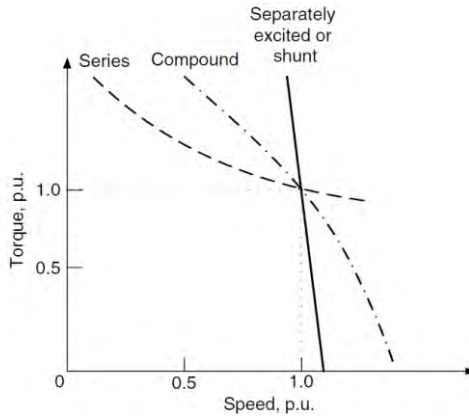
disertai beban sebab apabila tanpa beban motor akan mempercepat tanpa terkendali. Kumparan medan terbuat dari sejumlah kecil kumparan dengan penampang kawat yang besar. Tipe demikian dirancang untuk mengalirkan arus besar dan terhubung seri/deret dengan kumparan rotor. Motor DC jenis ini cocok untuk penggunaan yang memerlukan torsi penyalan awal yang tinggi, seperti derek dan alat pengangkat *hoist*.

- e. Motor DC kompon/campuran. Konfigurasi motor DC tipe ini menggunakan gabungan dari kumparan seri dan *shunt*/paralel. Pada motor DC jenis ini, kumparan medan dihubungkan secara paralel dan seri dengan kumparan jangkar. Dengan demikian, motor DC jenis ini akan memiliki torsi penyalan awal yang baik dan kecepatan yang stabil. Semakin tinggi persentase penggabungan, yaitu persentase kumparan medan yang dihubungkan secara seri, maka semakin tinggi pula torsi penyalan awal yang dapat ditangani.



Gambar 2.6 Jenis-Jenis Motor DC

Karakteristik kecepatan dan torsi motor DC dapat dilihat pada Gambar 9. Pada motor DC *series* setiap kenaikan torsi pasti diikuti dengan kenaikan arus jangkar dan kenaikan fluks magnet. Karena fluks meningkat diikuti torsi, maka tegangan akan menurun untuk menyeimbangkan antara tegangan induksi dengan tegangan sumber. Motor DC *series* sesuai untuk digunakan pada sistem yang membutuhkan torsi starting tinggi dan torsi yang berat seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karkteristik Kecepatan dan Torsi Motor DC

2.4 Kontroler Proporsional Integral (PI)[5]

Salah satu jenis kontroler berdasarkan aksi kontrolnya adalah kontroler proporsional ditambah integral. Kontroler proporsional ditambah integral merupakan kontroler yang aksi kontrolnya mempunyai sifat proporsional dan integral terhadap sinyal kesalahan.

Untuk kontroler proporsional ditambah integral, sinyal kesalahan $e(t)$ merupakan masukan kontroler sedangkan keluaran kontroler adalah sinyal kontrol $u(t)$. Hubungan antara masukan kontroler $e(t)$ dan keluaran kontroler $u(t)$ adalah

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.1)$$

Atau dalam besaran transformasi laplace

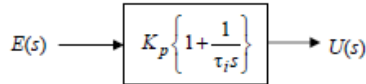
$$U(s) = K_p \left(e(s) + \frac{1}{\tau_i s} E(s) \right) \quad (2.2)$$

Dimana K_p adalah penguatan proporsional dan τ_i adalah waktu integral. Parameter K_p dan τ_i keduanya dapat ditentukan.

Sehingga fungsi alih kontroler proporsional ditambah integral adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right\} \quad (2.3)$$

Diagram blok kontroler proporsional ditambah integral dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram blok kontroler PI

2.5 Diagram Bode[6]

Diagram bode merupakan salah satu metode analisa dalam perancangan sistem kontrol yang memperhitungkan respon frekuensi sistem yang di plot secara logaritmik. Diagram bode terdiri dari dua grafik, yaitu grafik logaritmik magnitude dari fungsi alih dan grafik sudut fasa. Representasi standar dari magnitude logaritmik $G(j\omega)$ adalah $20\log|G(j\omega)|$, dimana dasar logaritmanya adalah 10. Unit yang digunakan dalam representasi ini besarnya adalah desibel (dB).Keuntungan dari menggunakan diagram bode adalah perkalian dari magnitude dapat dikonversikan menjadi penambahan dan juga sebagai metode untuk sketsa perkiraan kurva log-magnitude.

Faktor dasar yang sering terdapat pada fungsi transfer $G(j\omega)H(j\omega)$ adalah :

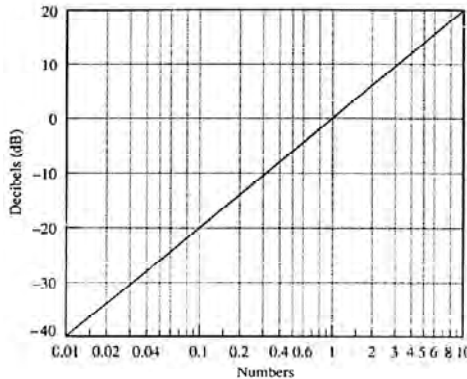
1. Penguatan K
2. Faktor integral dan derivatif $(j\omega)^{\pm 1}$
3. Faktor orde pertama $(1+j\omega T)^{\pm 1}$
4. Faktor orde kedua $[1 + 2\xi(j\omega/\omega) + (j\omega/\omega)^2]^{\pm 1}$

2.5.1 Penguatan K

Kurva magnitude-log untuk penguatan K yang konstan merupakan garis horizontal dengan besaran $20\log KdB$ dan sudut fase penguatan K adalah nol. Pengaruh perubahan penguatan K pada fungsi alih dapat menaikkan atau menurunkan kurva magnitude-log fungsi alih sesuai dengan besaran $20\log K$, tetapi tidak mempunyai pengaruh terhadap sudut fasa. Jika bilangan membesar dengan faktor 10, maka dB

membesar dengan faktor 20 sesuai dengan persamaan 2.4. Dan garis konversi penguatan K dapat dilihat pada gambar 2.9.

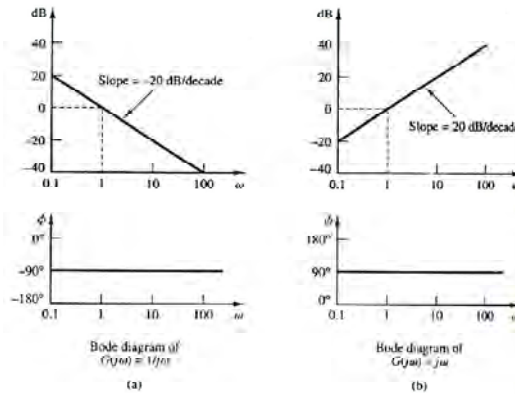
$$20 \log(K \times 10^n) = 20 \log K + 20n = -20 \log \frac{1}{K} + 200n \quad (2.4)$$



Gambar 2.9 Garis konversi bilangan-dB

2.5.2 Faktor integral dan derivatif $(j\omega)^{\pm 1}$

pada diagram bode, rasio frekuensi dinyatakan dalam bentuk oktaf atau dekade. Oktaf adalah pita frekuensi dari ω_1 sampai $2\omega_1$, dengan ω_1 adalah suatu harga frekuensi sembarang. Dekade adalah pita frekuensi dari ω_1 sampai $10\omega_1$, dengan ω_1 adalah suatu harga frekuensi sembarang. Sudut fasa dari $1/j\omega$ adalah konstan yaitu 90° . Logaritmik magnitude $1/j\omega$ dalam satuan dB adalah $20 \log \left| \frac{1}{j\omega} \right| = -20 \log \omega \text{ dB}$. Perbedaan respon frekuensi dari faktor $1/j\omega$ dan $j\omega$ terletak pada kemiringan kurva log-magnitude dan sudut fase. Kedua log-magnitude tersebut menjadi sama dengan 0 dB pada $\omega = 1$. Kurva respon frekuensi untuk $1/j\omega$ dan $j\omega$ dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Kurva respon frekuensi untuk $1/j\omega$ dan $j\omega$

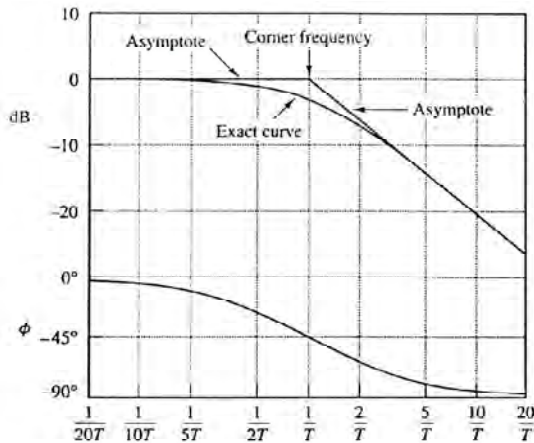
Log-magnitude kemiringan dan sudut fase berdasarkan persamaan (2.5) dan (2.6).

$$20 \log \left| \frac{1}{(j\omega)^n} \right| = -n \times 20 \log |j\omega| = -20n \log \omega \text{ dB} \quad (2.5)$$

$$20 \log |(j\omega)^n| = n \times 20 \log |j\omega| = 20n \log \omega \text{ dB} \quad (2.6)$$

2.5.3 Faktor orde pertama $(1+j\omega T)^{\pm 1}$

Diagram bode respon frekuensi dari faktor $1/(1+j\omega T)$ dapat didekati dengan dua buah garis lurus asimtot, satu garis lurus pada 0 dB untuk daerah frekuensi $0 < \omega < 1/T$, dan garis lurus dengan kemiringan -20 dB/dekade atau -6 dB/oktaf untuk rentang frekuensi $1/T < \omega < \infty$. Pada $\omega = 1/T$, besaran-lognya 0 dB, pada $\omega = 10/T$, besaran-lognya -20 dB. Jadi harga $-20 \log \omega T$ dB mengecil oleh 20 dB untuk setiap dekade dari ω . Untuk $\omega \geq 1/T$, kurva besaran-log tersebut menjadi suatu garis lurus dengan kemiringan -20 dB/dekade atau -6 dB/oktaf. Kurva magnitude dan fasa faktor orde pertama $(1+j\omega T)^{\pm 1}$ dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Faktor orde pertama $(1+j\omega T)^{\pm 1}$

Besaran-log, kurva sudut fase dan asimtot $1/(1+j\omega T)$. Frekuensi pada perpotongan dua asimtot disebut frekuensi sudut atau frekuensi patah (*corner frequency* atau *break frequency*). Untuk faktor $1/(1+j\omega T)$, frekuensi $\omega=1/T$ merupakan frekuensi patah karena pada $\omega=1/T$ kedua asimtot mempunyai harga yang sama. Frekuensi patah membagi kurva respon frekuensi dua daerah, yaitu kurva frekuensi rendah dan kurva frekuensi tinggi.

Magnitude-log dari factor orde pertama $1/(1+j\omega T)$ adalah

$$20 \log \left| \frac{1}{1+j\omega T} \right| = -20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \text{ dB} \quad (2.7)$$

Untuk frekuensi rendah, sedemikian rupa sehingga $\omega \ll 1/T$, magnitude-log dapat didekati dengan nilai

$$-20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} = -20 \log 1 = 0 \text{ dB} \quad (2.8)$$

Jadi, kurva magnitude-log pada frekuensi rendah terletak digaris konstan 0dB. Untuk frekuensi tinggi, sedemikian rupa sehingga $\omega \gg 1/T$ bisa didapatkan dengan nilai

$$-20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} = -20 \log \omega T \text{ dB} \quad (2.9)$$

Sudut fase eksak ϕ dari faktor $1/(1+j\omega T)$ adalah

$$\phi = -\tan^{-1} \omega T$$

Pada frekuensi nol, sudut fasenya adalah 0° . Pada frekuensi patah, sudut fasenya adalah

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{T}{T} = -\tan^{-1} 1 = -45^\circ \quad (2.10)$$

Di titik takterhingga, sudut fasenya menjadi -90° . Karena sudut fase dinyatakan oleh fungsi tangen balik, maka sudut fase simetrik miring terhadap titik kaku (*infleksi*) di $\phi = -45^\circ$. Error kurva besaran yang ditimbulkan oleh penggunaan asimtot-asimtot dapat dihitung dengan

$$error(dB) = -20 \log 1 - 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} + 20 \log \omega T \text{ dB}$$

2.5.4 Faktor orde kedua $[1 + 2\xi(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\pm 1}$

Sistem pengendalian mempunyai faktor kuadratik yang berbentuk sebagai berikut

$$\frac{1}{1 + 2\xi(j\frac{\omega}{\omega_n}) + (j\frac{\omega}{\omega_n})^2} \quad (2.11)$$

Kurva respon frekuensi asimtotik dapat diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$20 \log \left| \frac{1}{1 + 2\xi(j\frac{\omega}{\omega_n}) + (j\frac{\omega}{\omega_n})^2} \right| = -20 \log \sqrt{\left(1 - j\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.12)$$

Untuk frekuensi rendah $\omega \leq \omega_n$, besaran-log menjadi $-20 \log 1 = 0 \text{ dB}$. Jadi asimtot frekuensi rendah merupakan garis horizontal pada 0 dB . Untuk frekuensi tinggi $\omega \geq \omega_n$, besaran-lognya menjadi

$$-20 \log \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = -40 \log \frac{\omega}{\omega_n} \text{ dB} \quad (2.13)$$

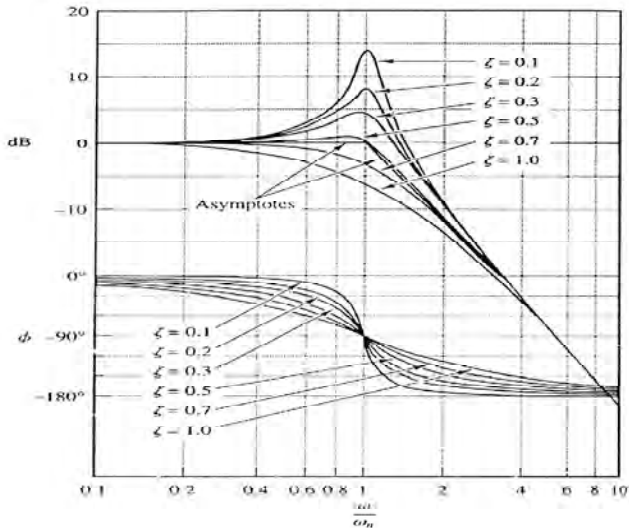
Persamaan untuk asimtot frekuensi tinggi merupakan garis lurus dengan kemiringan -40 dB/dekade karena,

$$-40 \log \frac{10\omega}{\omega_n} = -40 \log \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.14)$$

Asimtot frekuensi tinggi memotong asimtot frekuensi rendah $\omega_n = \omega_n$, karena pada frekuensi ini,

$$-40 \log \frac{\omega_n}{\omega_n} = -40 \log 1 = 0 \text{ dB} \quad (2.15)$$

frekuensi ini merupakan frekuensi patah faktor kuadratik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.12.



Gambar 2.12 Magnitud-log dan sudut fase faktor kuadratik

2.6 Kompensator[6]

Kompensator diperlukan dalam suatu sistem apabila sistem tersebut memerlukan bantuan untuk memenuhi performa yang diinginkan. Dalam perancangan kompensator, penyusun sistem kontrol harus terlebih dulu menentukan fungsi alih dari sistem. Kompensator dapat

berfungsi memanipulasi antara variabel penyusun sistem sehingga sistem dapat mengikuti perilaku dinamis yang terjadi. Kompensator dapat berguna untuk mengurangi sinyal *error* yang terdapat di dalam sistem. Kompensator dapat terhubung seri dan paralel terhadap *plant*.

Kompensator yang terhubung seri dengan *plant* dapat diletakkan sebagai berikut:

4.2.1 Diluar *plant*

Kompensator dapat diletakkan didepan *plant* atau dibelakang *plant* (*feedback*)

4.2.2 Di dalam *plant*.

Kompensator di dalam *plant* dapat diletakkan diantara *subplant* dari sistem yang dirancang

Kompensator yang terhubung paralel dengan *plant* dapat diletakkan pada:

1. Paralel dengan *input* atau *output plant*
2. Paralel pada komponen dalam *plant*

Klasifikasi kompensator berdasarkan kurva fasa adalah sebagai berikut

- a. Kompensator lead (fasa *output* mendahului fasa *input*)
- b.

$$G_c = \frac{K^* \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{\alpha_i} s + 1 \right)}{\prod_{j=1}^n \left(\frac{1}{\beta_j} s + 1 \right)}; \quad (2.16)$$

$$\{\alpha_{i,i} = 1, 2, \dots, n\} < \{\beta_{j,j} = 1, 2, \dots, n\} \quad (2.17)$$

- c. Kompensator lag (fasa *output* tertinggal fasa *input*)
Bentuk fungsi G_c seperti persamaan 2.16.

$$\{\alpha_{i,i} = 1, 2, \dots, n\} > \{\beta_{j,j} = 1, 2, \dots, n\} \quad (2.18)$$

- d. Kompensator lead-leg, lag-lead, lead-lag-lead, lag-lead-lag, dan seterusnya
Bentuk fungsi G_c seperti persamaan 2.16.

Lead-lag,

$$n = 2; \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 > 0; \alpha_1 < \alpha_2 < \beta_1 < \beta_2 \quad (2.19)$$

Lag-lead,

$$n = 2; \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 > 0; \beta_1 < \alpha_1 < \alpha_2 < \beta_2 \quad (2.20)$$

Lead-lag-lead,

$$n = 3; \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0; \quad \alpha_1 < \beta_1 < \beta_2 < \alpha_2 < \alpha_3 < \beta_3 \quad (2.21)$$

Lag-lead-lag ,

$$n = 3; \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0; \quad \beta_1 < \alpha_1 < \alpha_2 < \beta_2 < \beta_3 < \alpha_3 \quad (2.22)$$

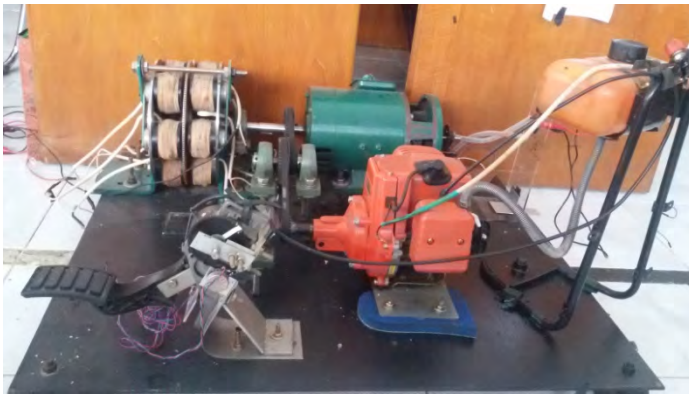
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III

PERANCANGAN SISTEM

3.1. Perancangan Simulator *Hybrid Electric Vehicle* (HEV)

Proses perancangan ini adalah perancangan sistem yang akan digunakan pada sistem kontrol, dimana perancangan tersebut terbagi menjadi dua, yaitu perancangan komponen mekanik dan komponen elektronik. Hal ini dikarenakan simulator HEV yang sudah ada dan bisa digunakan sehingga perancangan lebih mengacu kepada komponen-komponen pendukungnya. Bentuk fisik simulator HEV dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Simulator *Hybrid Electric Vehicle*

3.1.1 Perancangan Komponen Mekanik

a. *Internal Combustion Engine* (ICE)

Motor bakar yang digunakan dalam simulator HEV adalah sebuah mesin pemotong rumput. Motor bakar ini termasuk tipe motor bensin dua langkah. ICE yang digunakan pada simulator HEV berfungsi sebagai motor penggerak utama pada HEV. Spesifikasi ICE dan bentuk fisik ICE akan dijelaskan pada tabel 3.1 dan gambar 3.2

Tabel 3.1 Spesifikasi ICE

SPESIFIKASI	
Kapasitas silinder	33,8 cc
Pemasukkan bahan bakar	Karburator
<i>Starter</i>	<i>Recoil Starter</i>
Sistem Pengapian	<i>Electronic Ignition</i>
Sistem Kopling	Kering, sentrifugal
Kecepatan putar maksimum	8000 RPM
Daya keluaran	1,8 HP

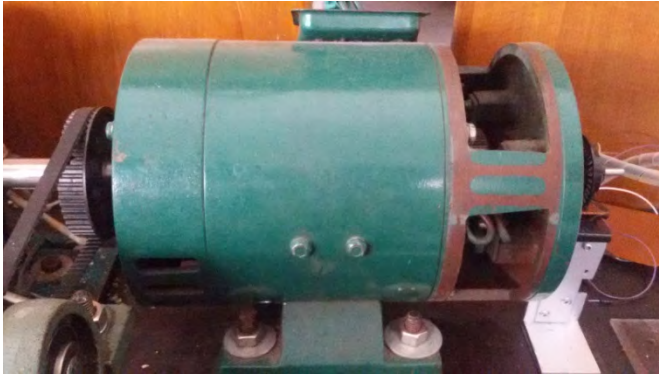


Gambar 3.2 Bentuk fisik ICE pada simulator HEV

b. Motor DC

Motor DC pada simulator HEV berperan sebagai motor listrik dalam HEV. Motor DC akan membantu kinerja ICE dalam mencapai kecepatan yang diinginkan dan juga membantu ICE pada saat ICE mempertahankan kecepatan pada kondisi pembebanan dari rem elektromagnetik. Bentuk fisik

dan spesifikasi Motor DC terdapat pada gambar 3.3 dan tabel 3.2.



Gambar 3.3 Bentuk fisik Motor DC

Tabel 3.2 Spesifikasi Motor DC

SPESIFIKASI	
Tegangan Nominal	150 Volt
Kecepatan putar maksimum	2000 RPM
Tipe	Paralel
Daya Keluaran	0,5 HP

c. Rem Elektromagnetik

Pada simulator HEV, kondisi pembebanan yang dimaksud adalah fungsi dari rem elektromagnetik. Rem elektromagnetik diletakkan satu poros dengan Motor DC. Rem elektromagnetik terdiri dari dua piringan besi yang diberi konduktor berupa kumparan yang dililit.

Ketika rem elektromagnetik dialiri arus listrik maka rem elektromagnetik akan menghasilkan gaya yang berlawanan dengan arah putar poros motor. Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan kecepatan yang dan disebut sebagai kondisi pembebanan untuk sistem simulator HEV. Bentu fisik dari rem

elektromagnetik yang digunakan pada simulasi HEV dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rem Elektromagnetik Simulator HEV

d. Roda Gigi Penghubung

Pada sistem ini, poros dari motor DC dan ICE terpasang secara terpisah. Untuk menghubungkan kedua poros tersebut digunakan *belt* dan *gear* dengan ukuran yang sesuai. *Range* kerja dari ICE berkisar antara 0-8000 RPM, sedangkan motor DC memiliki *range* kerja 0-2000 RPM. Untuk itu pemasangan *gear* dibutuhkan untuk membuat poros baru sehingga kecepatan putar pada poros akan sama. Roda gigi penghubung pada simulator HEV dapat dilihat pada gambar 3.5. Perbandingan *gear* antara motor DC dan ICE dapat menggunakan rumus:

$$\omega_{dc} R_{dc} = \omega_{bk} R_{bk} \quad (3.1)$$

$$\tau_{dc} \omega_{bk} = \tau_{bk} \omega_{dc} \quad (3.2)$$

$$\frac{\omega_{dc}}{\omega_{bk}} = \frac{\tau_{bk}}{\tau_{dc}} = \frac{R_{dc}}{R_{bk}} \quad (3.3)$$

$$\frac{\tau_{bk}}{\tau_{dc}} = \frac{R_{dc}}{R_{bk}} = \frac{2000}{8000} = \frac{1}{4}$$

Dimana,

ω_{dc}	= kecepatan sudut motor DC
ω_{bk}	= kecepatan sudut ICE
R_{dc}	= jari-jari roda gigi motor DC
R_{bk}	= jari-jari roda gigi ICE
τ_{dc}	= torsi motor DC
τ_{bk}	= torsi ICE

Berdasarkan persamaan (3.3) maka untuk menyamakan kecepatan putar dibutuhkan perbandingan *gear* 1:4. Untuk efisiensi tempat maka diperlukan tambahan *gear* ditengah untuk menghubungkan kedua *gear*. Perbandingan *gear* tengah untuk penghubung antara *gear* motor DC dan *gear* ICE terdapat pada persamaan berikut:

$$\omega_{bk}R_{bk} = \omega_{cbk}R_{cbk} \quad (3.4)$$

$$\omega_{dc}R_{dc} = \omega_{cdc}R_{cdc} \quad (3.5)$$

Karena seporos, maka $\omega_{cbk} = \omega_{cdc}$
Sehingga,

$$\frac{\omega_{bk}R_{bk}}{R_{cbk}} = \frac{\omega_{dc}R_{dc}}{R_{cdc}} \quad (3.6)$$

$$\frac{\omega_{dc}}{\omega_{bk}} = \frac{R_{bk}}{R_{cbk}} \times \frac{R_{cdc}}{R_{dc}}$$

$$\frac{\omega_{dc}}{\omega_{bk}} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \quad (3.7)$$

Jadi didapatkan,

$$R_{bk}:R_{cbk} = 1:2 \quad (3.8)$$

$$R_{dc}:R_{cdc} = 2:1 \quad (3.9)$$

Dimana,

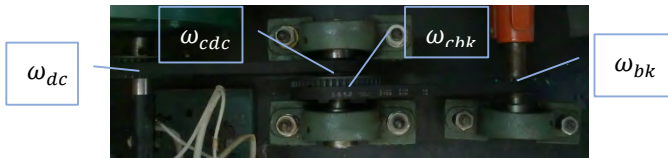
ω_{cdc} = kecepatan sudut roda gigi tengah yang terhubung

dengan motor DC

ω_{cbk} = kecepatan sudut roda gigi tengah yang terhubung dengan ICE

R_{cdc} = jari-jari roda gigi tengah yang terhubung dengan motor DC

R_{cbk} = jari-jari roda gigi tengah yang terhubung dengan ICE



Gambar 3.5 Gear penghubung simulator HEV

e. Pedal Gas

Set Point yang diberikan pada simulator HEV berupa pedal gas. Pedal gas langsung terhubung ke karburator ICE dua langkah (dua tak) untuk mengatur bukaan *throttle*. Bukaan pijakan pegas untuk *Set Point* sebanding dengan bukaan *throttle* pada karburator. Untuk mengetahui bukaan pada *throttle* maka dibutuhkan sensor posisi. Pada simulator HEV ini sensor posisi menggunakan potensiometer yang diletakkan pada pedal gas untuk mengetahui perbandingan perubahan sudut pedal gas dengan bukaan *throttle* ICE. Perubahan besarnya hambatan pada potensiometer sebanding lurus dengan perubahan presentase bukaan pada *throttle* ICE. Hubungan antara hambatan potensiometer dengan presentase bukaan *throttle* dapat dilihat dari persamaan 3.10. Dan bentuk fisik dari pedal gas dan potensiometer ditunjukkan pada gambar 3.6.

$$f(x) = \frac{100x-1010}{-8,17} \quad (3.10)$$

Dimana,

$f(x)$ = presentase bukaan *throttle*
 x = resistansi potensiometer



Gambar 3.6 Pedal gas dan potensiometer

f. *Optocoupler*

Optocoupler pada simulator HEV digunakan sebagai sensor kecepatan yang diletakkan pada poros motor DC. *Optocoupler* yang digunakan pada simulator HEV dapat dilihat pada gambar 3.7. Pembacaan sensor ini menggunakan sebuah mikrokontroler *arduino* yang hasil datanya langsung direkam oleh software *LabView*.



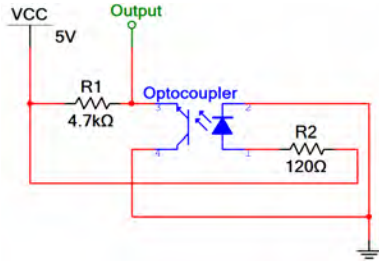
Gambar 3.7 Bentuk fisik optocoupler

3.1.2 Perancangan Komponen Elektronik

Komponen elektronik pada tugas akhir ini dirancang untuk mendukung kinerja dari simulator HEV dalam implementasi. Komponen yang dirancang, yaitu :

a. Rangkaian *Optocoupler*

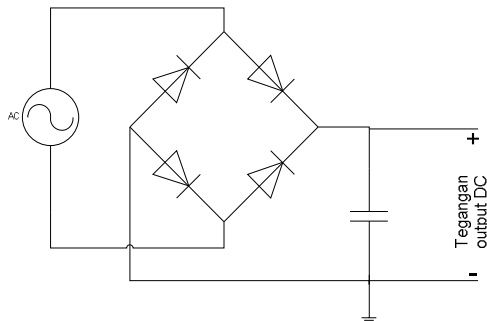
Perancangan rangkaian *optocoupler* dibuat agar *optocoupler* dapat melakukan pengambilan data kecepatan motor DC dengan baik. Berdasarkan *data sheet*, berikut adalah rangkaian *optocoupler* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Rangkaian *Optocoupler*

b. Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh

Motor DC pada simulator HEV membutuhkan tegangan 0-190 VDC pada pengoperasiannya. Sumber tegangan untuk motor DC didapatkan dari *autotrafo*. *Autotrafo* mengeluarkan tegangan yang berupa tegangan AC. Untuk itu digunakan sebuah rangkaian penyearah untuk mengubah tegangan AC yang dihasilkan *autotrafo* menjadi tegangan DC seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh

Rangkaian penyearah menggunakan dioda sebagai komponen utama. Dioda mempunyai karakteristik yang dapat digunakan sebagai dasar dalam penggunaan rangkaian penyearah. Karakteristiknya yaitu *short circuit* ketika *forward bias* dan *open circuit* ketika *reverse bias*. Cara kerja dari rangkaian penyearah yaitu empat diode disusun menjadi rangkaian jembatan dengan satu buah kapasitor. Dua dioda berfungsi sebagai penghantar tegangan AC dan dua diode berfungsi sebagai penahan pada siklus yang serupa. Kapasitor disini berfungsi sebagai pengurang *ripple* pada proses penyearah.

3.2. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada tugas akhir ini bertujuan untuk membantu dalam pengambilan data pada simulator HEV. Data diambil pada saat proses identifikasi dan pemodelan sistem.

a. Software Arduino

Dalam perancangan perangkat lunak, *software* arduino digunakan sebagai penghubung antara simulator HEV dengan *software* labview. *Software* arduino digunakan untuk mengambil data kecepatan dari sensor *optocoupler*. Data kecepatan ini ditampilkan dalam layar komunikasi serial dalam *software* arduino yang terdapat di layar komputer. Data kecepatan yang akan digunakan dalam pengambilan data didapatkan melalui perhitungan yang terdapat di dalam program arduino. Perhitungan kecepatan ini didasarkan pada cara kerja dari *optocoupler* yang digunakan sebagai sensor kecepatan yang letaknya langsung satu poros dengan poros motor DC. Tampilan *software* arduino dapat dilihat pada gambar 3.10.


```

encoder
//Pin dari encoder menuju arduino
#define encoder 3
unsigned long t;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(encoder, INPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  if (Serial.available())
  {
    delay(1);
    if (Serial.read() == 'M')
    {
      while (Serial.available())
      {
        Serial.read();
      }

      unsigned long waktu = pulseIn(encoder, HIGH);
      float jeda = waktu;
      jeda = jeda / 1000000;
      float kecepatan = (1 / (jeda * 72)) * 60;
      float y = 229.9536927+(0.600455391*kecepatan);
      word rpm = y;
      Serial.print(rpm);
    }
  }
}

```

Gambar 3.10 Tampilan software arduino

Selain pengambilan data kecepatan motor DC oleh software arduino, dilakukan juga pengambilan kecepatan menggunakan tachometer digital. Hal ini ditujukan agar pengambilan data mempunyai dua nilai referensi. Dalam software arduino dilakukan linearisasi data kecepatan yang dibaca dari *optocoupler* dan tachometer digital. Hal ini ditujukan agar kecepatannya yang diolah oleh Labview memiliki sedikit perbedaan dengan data kecepatan asli seperti yang ditujukan pada tabel 3.3.

$$f(x) = 61,4764455 + 0,8205613x \quad (3.11)$$

Dimana,

$f(x)$ = kecepatan *output* arduino

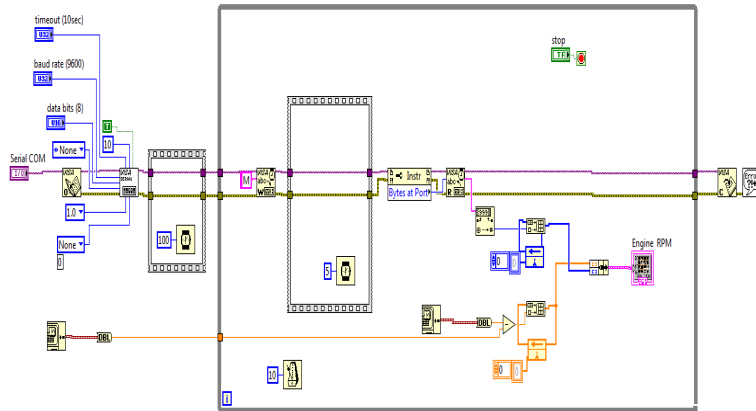
x = kecepatan *output optocoupler*

Tabel 3.3 Perbandingan Kecepatan untuk Diolah *Labview* dengan Kecepatan Asli (dalam RPM)

Kecepatan untuk Labview	Kecepatan Asli (Tachometer Digital)
592,3796066	595
981,3256628	981
1133,129503	1136
1179,901497	1179
1229,955737	1226
1348,937125	1339
1531,922295	1539
1614,798986	1606
1677,982207	1676
1716,548588	1743
1819,11875	1806

b. Software labview

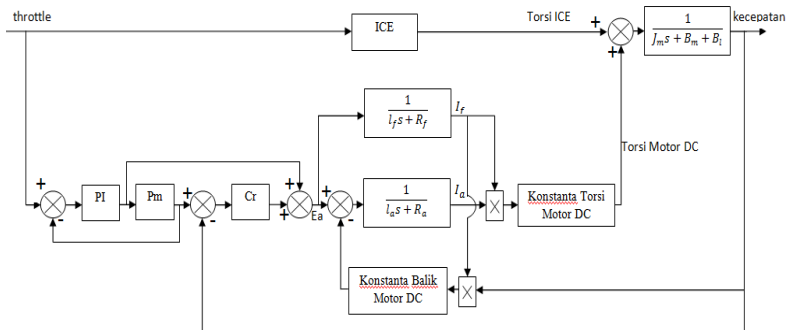
Perancangan software labview ditujukan untuk menampilkan data kecepatan motor DC dalam bentuk grafik. Data grafik yang sudah didapatkan dalam software labview akan dijadikan juga dalam bentuk data excel yang lebih memudahkan untuk menentukan nilai τ dari motor DC. Data dari excel nantinya dapat digunakan dalam menentukan karakteristik-karakteristik *plant* yang nantinya dapat menjadi acuan untuk merancangan kontroler yang akan digunakan pada sistem kontrol untuk *plant* simulator PHEV. Tampilan software labview yang digunakan dalam mengambil data untuk motor DC dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 LabView

3.3. Identifikasi dan Pemodelan Sistem

Pengambilan data berupa identifikasi dan pemodelan sistem simulator HEV bertujuan untuk membuat pemodelan matematika dari simulator HEV. Model matematika simulator HEV yang didapatkan dari identifikasi digunakan untuk perancangan kontroler. Identifikasi parameter ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu motor DC, ICE, dan beban. Parameter-parameter tersebut terdapat pada blok diagram simulator HEV yang ditunjukkan pada gambar 3.12.

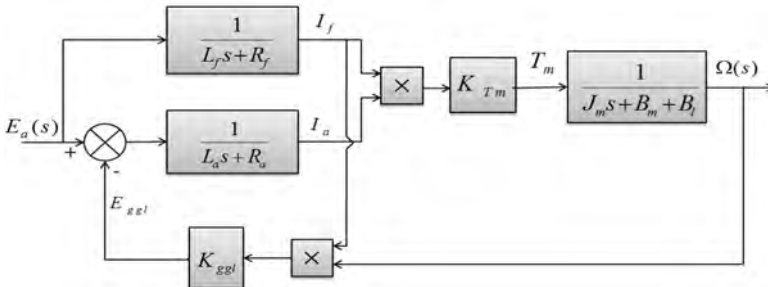


Gambar 3.12 Blok Diagram Simulator HEV

3.3.1 Parameter Motor DC

Pemodelan motor DC perlu didapatkan beberapa parameter, seperti konstanta balik motor DC (K_{ggl}), konstanta torsi motor DC (K_{TMDC}), induktansi dan resistansi kumparan jangkar (L_a, R_a), induktansi dan resistansi kumparan medan (L_f, R_f). Diagram blok pemodelan dapat dilihat pada gambar 3.15.

Percobaan memutar motor DC dengan menggunakan ICE dilakukan untuk mendapatkan nilai dari konstanta balik motor DC (K_{ggl}). Pada percobaan ini motor DC diberikan tegangan di kumparan medan. Percobaan ini dilakukan lima kali dimana tegangan yang dimasukkan ke dalam kumparan medan adalah 150 V, 160 V, 170 V, 180 V, dan 190 V. masing-masing tegangan dilakukan pada tiga kondisi kecepatan yang berbeda, yaitu 1000 RPM, 910 RPM, dan 830 RPM. Setelah semua data didapatkan, kita dapat menghitung nilai konstanta balik motor DC (K_{ggl}) sebesar 0.7154 menurut persamaan 3.13 dan hasil dari percobaan ini dapat dilihat pada tabel 3.4.



Gambar 3.13 Diagram Blok Motor DC

$$K_{TMDC} = \frac{\Delta \tau_{mdc}}{(I_{a \max} \times I_{f \max}) - (I_{a \text{ nom}} \times I_{f \text{ nom}})} \quad (3.12)$$

Dimana,

K_{TMDC} = konstanta torsi motor DC

τ_{mdc} = torsi motor DC

$I_{a \max}$ = arus jangkar kondisi maksimal

$I_{f \max}$ = arus medan kondisi maksimal
 $I_{a \text{ nom}}$ = arus jangkar kondisi nominal
 $I_{f \text{ nom}}$ = arus medan kondisi nominal

Tabel 3.4 Data Percobaan Konstanta Balik Motor DC

No.	V_{in} (V)	Kecepatan		I_f (A)	E_a (V)	K_{ggl}
		RPM	RPS			
1	150	1000	104,667	0,0729	68	0,933
2	160	1000	104,667	0,0795	70	0,881
3	170	1000	104,667	0,0835	72	0,862
4	180	1000	104,667	0,0945	73	0,772
5	190	1000	104,667	0,1006	75	0,746
6	150	910	95,247	0,0778	54	0,763
7	160	910	95,247	0,0816	59	0,795
8	170	910	95,247	0,0866	59	0,749
9	180	910	95,247	0,0916	60	0,719
10	190	910	95,247	0,0952	62	0,716
11	150	830	86,873	0,0767	49	0,769
12	160	830	86,873	0,0822	52	0,762
13	170	830	86,873	0,0864	56	0,781
14	180	830	86,873	0,0924	57	0,743
15	190	830	86,873	0,0972	59	0,731
Rata-Rata K_{ggl}						0,7154

Percobaan ini juga dilakukan pada dua kondisi motor DC dengan kondisi maksimal dan kondisi nominal. Pada kondisi maksimal motor DC diberikan tegangan masukan sebesar 190 V dan rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan sebesar 80 V. Kondisi nominal adalah pada saat motor DC diberikan tegangan masukan nominal 150 V dan rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan sebesar 40 V. Data dari percobaan dua kondisi motor DC adalah berikut.

Tabel 3.5 Data Percobaan Kondisi Maksimun dan Nominal

Parameter	Nilai (A)
$I_{a\ max}$	6,42
$I_{a\ nom}$	4,27
$I_{f\ max}$	0,0763
$I_{f\ nom}$	0,063

Setelah percobaan kondisi maksimum dan nominal didapatkan seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.5, selanjutnya adalah percobaan untuk mencari nilai $\Delta\tau_{mdc}$ berdasarkan persamaan

$$P_{in} = V_{in}(I_a + I_f) = P_{rugi-rugi} + \tau_m \times \omega \quad (3.13)$$

Dimana,

P_{in} = daya *input* motor DC

V_{in} = tegangan *input* motor DC

I_a = arus jangkar

I_f = arus medan

$P_{rugi-rugi}$ = daya rugi-rugi motor DC

τ_m = torsi motor DC

ω = kecepatan motor DC

Percobaan ini dilakukan pada dua kondisi, kondisi pertama rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan sebesar 80 V lalu motor DC diberikan tegangan masukan sampai kecepatan motor DC mencapai 1450 RPM. Kondisi kedua rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan 40 V dan motor DC diberikan tegangan sampai kecepatan motor DC mencapai 1450 RPM. Pada percobaan ini $P_{rugi-rugi}$ dianggap sama karena percobaan dilakukan pada kecepatan yang sama yaitu 1450 RPM, sehingga persamaannya adalah

$$\omega(\tau_{m1} - \tau_{m2}) = V_{in1}(I_{a1} + I_{f1}) - V_{in2}(I_{a2} + I_{f2})$$
$$\Delta\tau_{mdc} = \frac{V_{in1}(I_{a1} + I_{f1}) - V_{in2}(I_{a2} + I_{f2})}{\omega} \quad (3.14)$$

Dimana,

V_{in1} = tegangan *input* motor DC saat beban 80 V

I_{a1} = arus jangkar saat beban 80 V

I_{f1} = arus medan saat beban 80 V

V_{in2} = tegangan *input* motor DC saat beban 40 V

I_{a2} = arus jangkar saat beban 40 V

I_{f2} = arus medan saat beban 40 V

Tabel 3.6 Data Percobaan Pencarian Nilai $\Delta\tau_{mdc}$

Parameter	Nilai
I_{a1}	6,42 A
I_{a2}	4,27 A
I_{f1}	0,0763 A
I_{f2}	0,0631 A
V_{in1}	63,5 V
V_{in2}	49 V

Setelah mendapatkan nilai $\Delta\tau_{mdc}$ seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.6, konstanta torsi motor DC (K_{TMDc}) dapat didapatkan dengan persamaan

$$K_{TMDc} = \frac{0,138}{(6,42 \times 0,0763) - (4,27 \times 0,063)} = 0,624 \quad (3.15)$$

Parameter yang dibutuhkan selanjutnya adalah nilai induktansi dan resistansi dari kumparan motor, baik kumparan jangkar maupun medan (L_a, R_a, L_f, R_f). Pengukuran parameter ini dilakukan dengan menggunakan alat LCR meter dan didapatkan data pada tabel 3.7.

Tabel 3.7 Induktansi dan Resistansi Motor DC

No	$L_f(\text{H})$	$L_a(\text{H})$
1	23.4	0.0912
2	23.3	0.0912
3	23.3	0.0911
4	23.4	0.0911
5	23.3	0.0912
Rata-rata	23.34	0.09116

3.3.2 Parameter Beban

Parameter beban pada simulator HEV adalah konstanta rem elektromagnetik (K_d), momen inersia beban (J_m), dan koefisien gesekan viskos beban (B_m). Parameter-parameter tersebut dapat didapatkan melalui persamaan

$$\omega \times B_m - \omega \times I_l \times K_d = K_{TMDC} \times I_a \times I_f \quad (3.16)$$

Dimana,

ω	= kecepatan motor DC
B_m	= koefisien gesek viskos beban
I_l	= arus rem elektromagnetik
K_d	= konstanta rem elektromagnetik
K_{TMDC}	= konstanta torsi motor DC
I_a	= arus jangkar
I_f	= arus medan

Untuk menentukan besarnya K_d dan B_m dilakukan dua percobaan. Percobaan pertama diketahui arus rem elektromagnetik saat beban 80 V (I_{l1}) sebesar 1,14 A dan percobaan kedua arus rem elektromagnetik saat beban 40 V (I_{l2}) sebesar 0,56 A. Parameter pada tabel 6 serta kedua parameter arus rem elektromagnetik (I_l) disubstitusikan ke persamaan 48, sehingga didapatkan persamaan 49 dan 50.

$$1450 \times B_m - 1450 \times 1,14 \times K_d = 0,624 \times 6,42 \times 0,0763$$

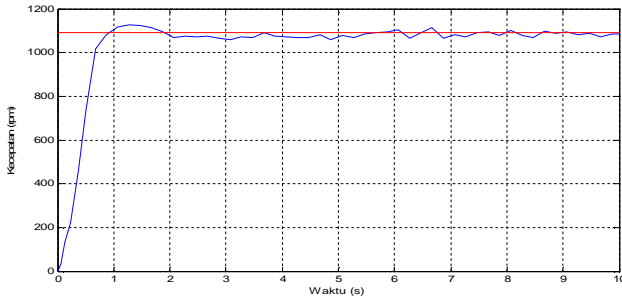
$$1450 B_m - 1653 K_d = 0,3057 \quad (3.17)$$

$$1450x B_m - 1450x 0,56x K_d = 0,624x 4,27x 0,0631$$

$$1450 B_m - 812 K_d = 0,1681 \quad (3.18)$$

Eliminasi persamaan (3.17) dan (3.18), sehingga didapatkan $K_d = -0,0001636$ dan $B_m = 0,00002462$.

Parameter momen inersia beban (J_m) bisa didapatkan dari respon sistem motor DC. Sinyal *step* diberikan sebagai *input* sebagai pengganti tegangan dari 0 V sampai 150 V dalam waktu yang singkat. Respon motor DC saat diberikan sinyal *step* dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Motor DC saat Diberikan *Input* Sinyal *Step*

$$\frac{1}{J_m s + B_m} = \frac{1/B_m}{J_m/B_m s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.19)$$

Sehingga,

$$\tau = \frac{J_m}{B_m} \quad (3.20)$$

$$J_m = \tau \times B_m \quad (3.21)$$

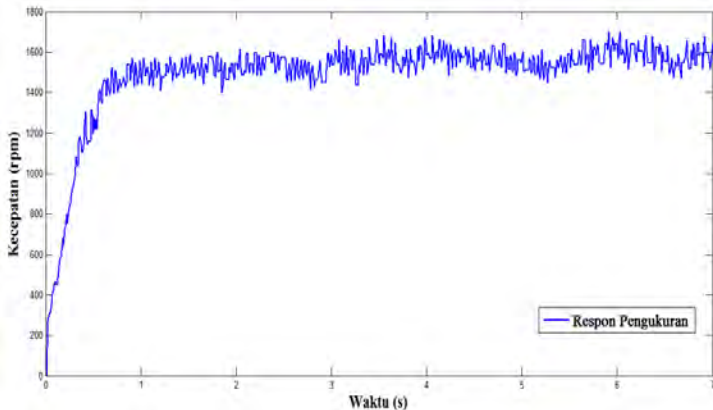
Berdasarkan gambar 3.16. didapatkan $\tau = 0.5$ dan $B_m = 0,00002462$ dari percobaan sebelumnya, substitusikan ke persamaan 53 dan didapatkan $J_m = 0.5x 0,0000246 = 0,00001231$.

3.3.3 Parameter *Internal Combustion Engine*

Pemodelan ICE dilakukan dengan metode strejc. Proses pemodelan menggunakan grafik respon dari ICE saat diberikan masukan sinyal *step*. Dari grafik akan didapatkan parameter yang akan menghasilkan model matematika untuk respon ICE. Pemodelan dibagi menjadi tiga, yaitu pembebanan minimal, pembebanan nominal, dan pembebanan maksimal.

a. Pembebanan Minimal

Grafik respon saat ICE diberikan pembebanan minimal dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Respon ICE Pembebanan Minimal

Dari grafik didapatkan parameter untuk mendapatkan model matematik yaitu,

$$Y_{ss} = 1523 \text{ RPM}$$

$$X_{ss} = 41,25$$

Dengan nilai Y_{ss} dan X_{ss} didapatkan

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} = \frac{1178}{64} = 36,97 \quad (3.22)$$

Selanjutnya dengan menarik garis miring yang memotong titik belok respons saat transien didapatkan,

$$T_U = 0,01 \text{ s}$$

$$T_N = 0,4 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0,0953}{0,7647} = 0,025 \quad (3.23)$$

Lihat tabel 3.8 untuk mendapatkan nilai y_i ,

Tabel 3.8 Parameter Identifikasi Metode Strejc

N	τ	y_t
2	0,104	0,264
3	0,218	0,327
4	0,319	0,359
5	0,41	0,371
6	0,493	0,384
7	0,57	0,394
8	0,642	0,401
9	0,709	0,407
10	0,773	0,413

$$y_i = 0,264(1523) \quad (3.24)$$

$$y_i = 402 \text{ rpm}$$

Dari grafik pada gambar 3.16, saat y_i didapatkan

$$t_i = 0,135 \text{ s}$$

Substitusikan nilai t_i ke persamaan,

$$\tau_{ST1} = \frac{t_i}{n-1} = \frac{0,135}{2-1} \quad (3.25)$$

$$\tau_{ST} = 0,135$$

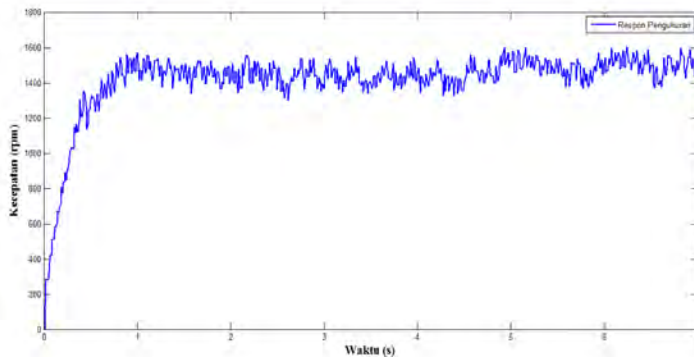
Didapatkan pemodelan matematika ICE pembebanan minimal sebagai berikut,

$$G_{ST2}(s) = \frac{K}{(\tau_{ST}s+1)^n} \quad (3.26)$$

$$G(s) = \frac{36.97}{(0.135s+1)^2} \quad (3.27)$$

b. Pembebanan Nominal

Pembebanan nominal adalah pembebanan dimana rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan sebesar 40 V. Grafik respon pembebanan nominal dapat dilihat pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Respon ICE Pembebanan Nominal

Dari grafik didapatkan parameter untuk mendapatkan model matematik yaitu,

$$Y_{ss} = 1448 \text{ RPM}$$

$$X_{ss} = 41,25$$

Dengan nilai Y_{ss} dan X_{ss} didapatkan

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} = \frac{1448}{41.25} = 35,14 \quad (3.28)$$

Selanjutnya dengan menarik garis miring yang memotong titik belok respons saat transien didapatkan,

$$T_U = 0,007 \text{ s}$$

$$T_N = 0,4 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0,007}{0,4} = 35,14 \quad (3.29)$$

Lihat tabel 8 untuk mendapatkan nilai y_i ,

$$y_i = 0,264(1148) \quad (3.30)$$

$$y_i = 376 \text{ rpm}$$

Dari grafik pada gambar 28, saat y_i didapatkan

$$t_i = 0,125 \text{ s}$$

Substitusikan nilai t_i ke persamaan,

$$\tau_{ST} = \frac{0,125}{2-1} \quad (3.31)$$

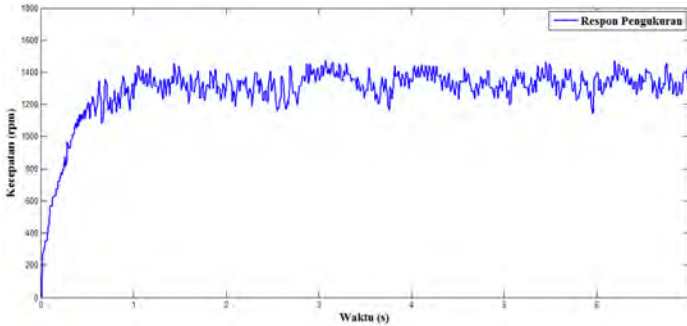
$$\tau_{ST} = 0,125$$

Didapatkan pemodelan matematika ICE pembebanan minimal sebagai berikut,

$$G(s) = \frac{35,14}{(0,125s+1)^2} \quad (3.32)$$

c. Pembebanan Maksimal

Pembebanan adalah pembebanan dimana rem elektromagnetik diberikan tegangan masukan sebesar 80 V. Grafik respon pembebanan maksimal dapat dilihat pada gambar 3.17.



Gambar 3.17 Respon ICE Pembebanan Maksimal

Dari grafik didapatkan parameter untuk mendapatkan model matematik yaitu,

$$Y_{ss} = 1323 \text{ RPM}$$

$$X_{ss} = 41,25$$

Dengan nilai Y_{ss} dan X_{ss} didapatkan

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} = \frac{1323}{41,25} = 32,11 \quad (3.33)$$

Selanjutnya dengan menarik garis miring yang memotong titik belok respons saat transien didapatkan,

$$T_U = 0,001 \text{ s}$$

$$T_N = 0,14 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0,001}{0,14} = 0,07 \quad (3.34)$$

Lihat tabel 8 untuk mendapatkan nilai y_i ,

$$y_i = 0,264(1323) \quad (3.35)$$

$$y_i = 350 \text{ rpm}$$

Dari grafik pada gambar 28, saat y_i didapatkan

$$t_i = 0,13 \text{ s}$$

Substitusikan nilai t_i ke persamaan,

$$\tau_{ST} = \frac{0,13}{2-1} \quad (3.36)$$

$$\tau_{ST} = 0,13$$

Didapatkan pemodelan matematika ICE pembebanan minimal sebagai berikut,

$$G(s) = \frac{32,11}{(0,13s+1)^2} \quad (3.37)$$

3. 4 Model Referensi

Model referensi merupakan model matematis yang mempunyai karaktersistik respon *plant* yang diinginkan. Perancangan model referensi harus memiliki *settling time* lebih cepat dua kali dari respon *plant* dan juga memiliki *rise time* lebih cepat dua kali. Dengan spesifikasi tersebut dipilih model referensi dengan fungsi alih ditunjukkan pada persamaan 3.40 dengan menggunakan model matematik ICE kondisi nominal ditunjukkan pada persamaan 3.38.

$$G = \frac{35,14}{0,015625s^2+0,25s+1} \quad (3.38)$$

Dimana

$$\omega_n=8$$

$$\xi = 1$$

Time constant respon didapatkan berdasarkan persamaan

$$\tau = t[0,632 \times Y_{ss}] \quad (3.39)$$

$$\tau = t[0,632 \times 1450]$$

$$\tau = t[916,4]$$

$$\tau = 0,28$$

Dengan settling time ($\pm 5\%$) sebesar 0.84 dan spesifikasi model referensi yang diinginkan dua kali lebih cepat, maka ditentukan settling time model referensi 0.42 dan nilai $\tau = 0.14$. berikut adalah model referensi untuk sistem.

$$G_m = \frac{35,14}{0,14s+1} \quad (3.40)$$

3. 5 Perancangan Kontroler PI

Pada tugas akhir ini akan digunakan kontroler PI, kontroler PI ini akan digunakan untuk mengatur model referensi di sistem kontrol. Perancangan kontroler PI dalam tugas akhir ini menggunakan metode *root locus*.

Model matematik *plant* :

$$\frac{T_m}{E_a} = \frac{1,161s+105,484}{2,127s^2+677,6163s+46943,3657} \quad (3.41)$$

Dengan τ^* yang diinginkan sebesar 0,14 s

Langkah pertama adalah menentukan nilai pole dan zero dari model matematik *plant*.

$$\text{pole 1} = -216,7595$$

$$\text{pole 2} = -101,8190$$

$$\text{zero} = -90,8562$$

$$K(s) = Kp \frac{(s + a)}{s}$$

Dimana

Kp =Konstanta Proporsional

a =pole yang diinginkan

a dipilih untuk pole -101.8190 dikarenakan pole tersebut mempunyai respon yang paling lambat, menentukan diagram *root locus* dengan melalui

$$s_{sys} = \frac{Kp(s + 101,8190)}{s} \times \frac{(s + 90,8562)}{(s + 101,8190)(s + 216,7595)}$$

$$s_{sys} = \frac{Kp}{s} \times \frac{(s + 90,8562)}{(s + 216,7595)} \quad (3.42)$$

Setelah itu persamaan s_{sys} dimasukkan menjadi diagram *root locus*. Di dalam diagram *root locus* dengan $\tau^*=0.14$, didapatkan pole(p^*) yang diinginkan sebesar -7.14 dan nilai *gain* sebesar 18.7. Lalu dengan nilai *gain* yang sama didapatkan pole dominan sebesar -228. Setelah nilai *gain* didapatkan persamaan s_{sys} dikoreksi dengan menggunakan sinyal *step* untuk mengoreksi apakah spesifikasi τ^* yang diinginkan apakah sudah sesuai dan sudah memenuhi 63.2% waktu dari *rise time*.

$$K = \frac{Kp(s + a)}{s} = \frac{18.7(s + 101,8190)}{s}$$

$$a = \frac{1}{\tau_i}$$

$$\tau_i = \frac{1}{101,8190} = 0.0098$$

Kontroler PI

$$PI = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i} \right) \quad (3.43)$$

$$PI = 18,7 \left(1 + \frac{1}{0,0098} \right)$$

3. 6 Perancangan Kompensator Robust

Perancangan kompensator robust berfungsi memanipulasi hubungan antara variabel penyusun sistem, sehingga perilaku dinamis sistem berubah memenuhi spesifikasi desain yang diinginkan. Perancangan kompensator robust didapatkan dari persamaan berikut. Dimana

G_p adalah model matematik dari *plant* motor DC hasil linearisasi dan G_m adalah model referensi.

$$G_c = \frac{G_m}{G_p(1-G_m)} \quad (3.44)$$

$$G_m = \frac{35,14}{0,14s + 1}$$

Untuk mendapatkan G_p dilakukan linearisasi pada persamaan torsi motor DC menjadi persamaan 3.45

$$T_m = K_{TM} x I_a x I_f \quad (3.45)$$

$$\check{T}_m = \frac{\partial(K_{TM} x I_a x I_f)}{\partial I_a} \Big|_{i_f=I_{fop}} \check{i}_a + \frac{\partial(K_{TM} x I_a x I_f)}{\partial I_f} \Big|_{i_a=I_{aop}} \check{i}_f \quad (3.46)$$

$$\check{T}_m = K_{TM} x I_{fop} x I_a + K_{TM} x I_{aop} x I_f \quad (3.47)$$

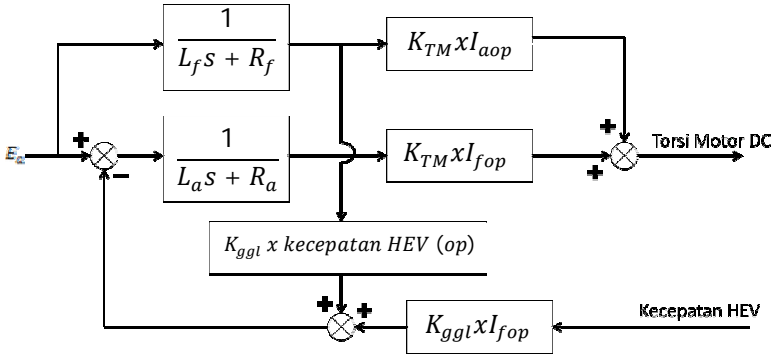
Selanjutnya linearisasi konstanta tegangan balik motor DC,

$$E_{ggl} = K_{ggl} x I_f x \Omega \quad (3.48)$$

$$\check{E}_{ggl} = \frac{\partial(K_{ggl} x I_f x \Omega)}{\partial I_f} \Big|_{\Omega=\Omega_{op}} \check{i}_f + \frac{\partial(K_{ggl} x I_f x \Omega)}{\partial \Omega} \Big|_{i_f=I_{fop}} \check{\Omega} \quad (3.49)$$

$$\check{E}_{ggl} = K_{ggl} x I_f x \Omega_{op} + K_{ggl} x I_{fop} x \Omega \quad (3.50)$$

Dengan dilinearisasikannya persamaan motor DC, maka blok diagram motor DC pada gambar 3.18.



Gambar 3.18 Blok Diagram Motor DC Hasil Linearisasi

Dari gambar didapatkan persamaan 3.51 dan 3.52

$$T_m = \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} (E_a - E_{ggl}) + \frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} E_a \quad (3.51)$$

$$E_{ggl} = \frac{K_{ggl} x \omega_{op}}{L_f s + R_f} E_a + (K_{ggl} x I_{fop} x \omega) \quad (3.52)$$

Dimana

I_{aop} = Arus jangkar motor DC saat beban nominal

I_{fop} = Arus medan motor DC saat beban nominal

ω_{op} = Kecepatan motor DC saat beban nominal

Substitusi persamaan 3.49 ke persamaan 3.50 sehingga didapatkan persamaan 3.53.

$$T_m = \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} \left(E_a - \left(\frac{K_{ggl} x \omega_{op}}{L_f s + R_f} E_a + K_{ggl} x I_{fop} x \omega \right) \right) + \frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} E_a \quad (3.53)$$

$$T_m = \frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} E_a + \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} \left(E_a - \frac{K_{ggl} x \omega_{op}}{L_f s + R_f} E_a - K_{ggl} x I_{fop} x \omega \right) \quad (3.54)$$

$$T_m = \frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} E_a + \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} E_a - \frac{K_{ggl} x I_{fop} x \omega x K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} - \frac{K_{ggl} x \omega_{op} x E_a x K_{TM} x I_{fop}}{(L_f s + R_f)(L_a s + R_a)} \quad (3.55)$$

$$T_m = E_a \left[\frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} + \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} - \frac{K_{ggl} x \omega_{op} x K_{TM} x I_{fop}}{(L_f s + R_f)(L_a s + R_a)} \right] - \underbrace{\frac{K_{ggl} x I_{fop} x \omega x K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a}}_{disturbance} \quad (3.56)$$

Persamaan 3.54 perlu diubah menjadi *state space* dengan ketentuan mengabaikan persamaan *disturbance*.

$$T_m = E_a \left[\frac{K_{TM} x I_{aop}}{L_f s + R_f} + \frac{K_{TM} x I_{fop}}{L_a s + R_a} - \frac{K_{ggl} x \omega_{op} x K_{TM} x I_{fop}}{(L_f s + R_f)(L_a s + R_a)} \right] \quad (3.57)$$

$$\frac{T_m}{E_a} = \frac{0,624 \times 4,27}{23,34s + 2377,1} + \frac{0,624 \times 0,063}{0,09s + 19,7} - \frac{0,71546 \times 1450 \times 0,624 \times 0,063}{(23,34s + 2377,1)(0,09s + 19,5)} \quad (3.58)$$

$$\frac{T_m}{E_a} = \frac{1,161s + 105,484}{2,127s^2 + 677,6163s + 46943,3657} \quad (3.59)$$

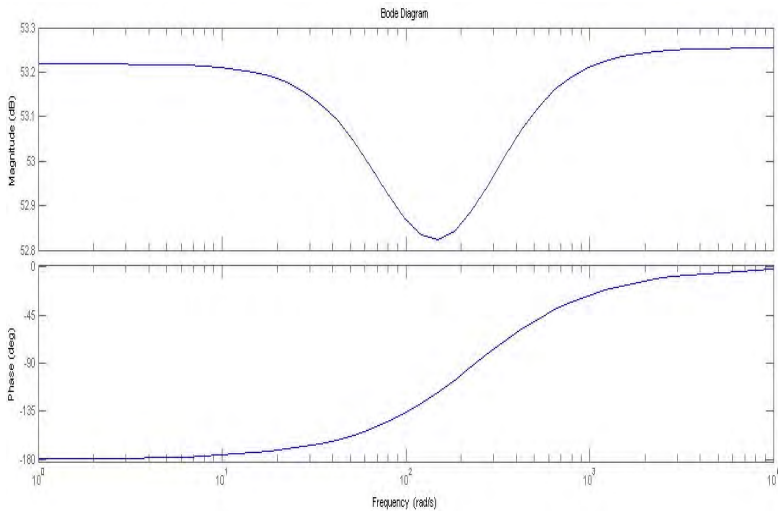
Untuk itu didapatkan G_P melalui persamaan 3.59.

$$G_P = \frac{1,161s + 105,484}{2,127s^2 + 677,6163s + 4694,3657}$$

$$G_C = \frac{\frac{35,14}{0,14s + 1}}{\frac{1,161s + 105,484}{2,127s^2 + 677,6163s + 46943,3657} \left(1 - \frac{35,14}{0,14s + 1} \right)} \quad (3.60)$$

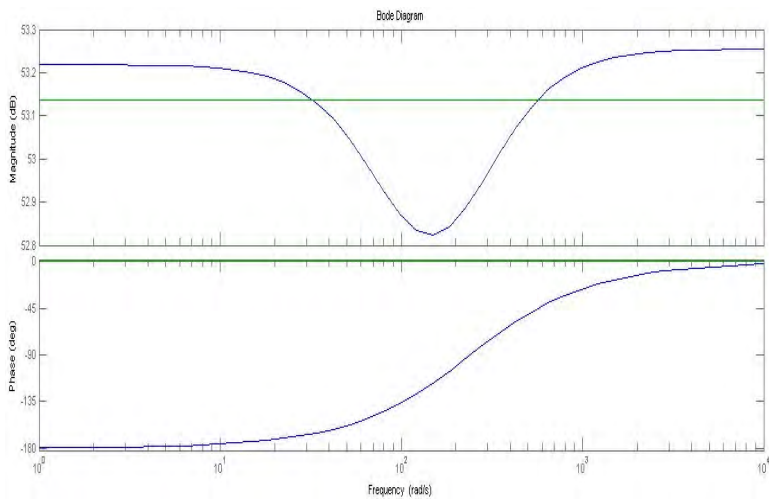
$$G_C = \frac{74,76s^2 + 2,382 \cdot 10^{-4}s + 1,65 \cdot 10^{-6}}{0,1625s^2 - 24,88s - 3602} \quad (3.61)$$

Persamaan G_c akan dimasukkan ke dalam fungsi matlab untuk melihat diagram bentuk diagram bode dari persamaan tersebut yang nantinya akan digunakan sebagai diagram acuan dalam menentukan bentuk bode yang mendekati bentuk bode dari G_c . Bentuk bode yang serupa dengan G_c inilah yang nantinya akan digunakan sebagai kompensator dalam sistem diagram kontrol. Berikut adalah diagram bode dari G_c yang ditunjukkan pada gambar 3.19.

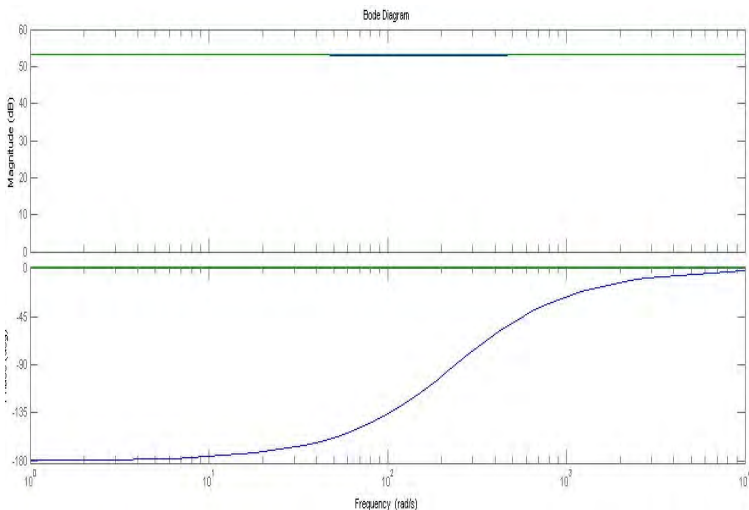


Gambar 3.19 Diagram bode G_c

Diagram bode dari G_c yang terdapat pada gambar 3.19 mengalami penurunan magnitude pada frekuensi 100 Hz yaitu sekitar 0,4 dB. Penurunan bode G_c pada diagram bode diatas terlihat penurunan magnitude yang kecil diantara 53,2 dan 52,8, maka pendekatan kompensator yang akan digunakan dalam diagram blok sistem kontrol dapat ditentukan dengan menentukan nilai *gain*. Dimana nilai *gain* tersebut nantinya dapat berupa diagram bode yang mendekati bentuk bode dari persamaan G_c . Nilai *gain* yang mendekati bentuk diagram bode G_c adalah 453,8. Nilai *gain* yang didapatkan adalah berupa garis lurus apabila dimasukkan ke dalam diagram bode. Bentuk dari diagram bode dari *gain* yang telah didapatkan ditunjukkan oleh gambar 3.20 dan 3.21.



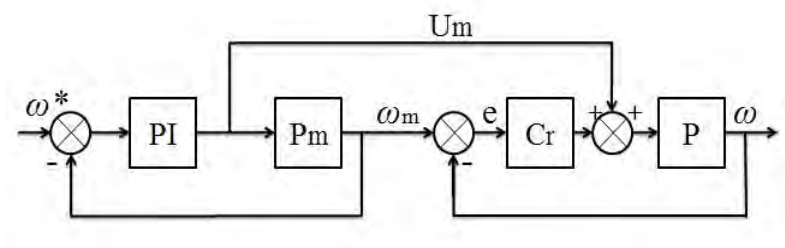
Gambar 3.20 Diagram bode G_c dan K



Gambar 3.21 Diagram bode G_c dan K dengan range dB diperbesar

Nilai kompensator (K) yang telah didapatkan akan dimasukkan ke dalam blok diagram sebagai nilai C_r untuk memenuhi parameter-

parameter yang dibutuhkan dalam diagram blok kontroler seperti ditunjukkan pada gambar 3. 22.



Gambar 3.22 Diagram blok PI-Robust[7]

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1. Gambaran Umum Pengujian Sistem

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian sistem melalui implementasi dan simulasi. Simulasi sistem pada tugas akhir merupakan tahap terakhir untuk pengujian implementasi pada *plant*. Pengujian sistem dalam simulasi bertujuan untuk mengetahui performansi kontroler yang telah dirancang untuk pengaturan *plant* sistem sehingga sistem mampu mencapai kondisi yang diinginkan.

4.2. Simulasi Sistem

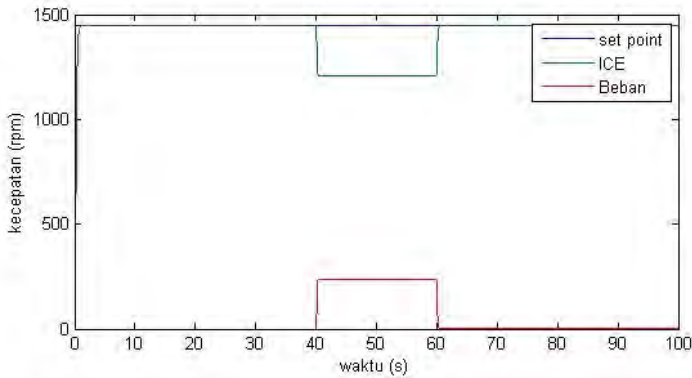
Simulasi sistem dilakukan dengan perangkat lunak Matlab. Simulasi sistem bertujuan untuk mengetahui performansi kontroler yang dirancang untuk pengaturan HEV.

4.2.1 Simulasi ICE Kondisi Beban Nominal Tanpa Bantuan Motor DC

Simulasi ICE dengan pengujian pemberian arus beban bertujuan untuk melihat respon ICE terhadap kondisi pembebanan. Dengan arus beban nominal sebesar 0,56 A, pengujian ditentukan dengan tiga macam besar arus rem elektromagnetik, yaitu : 0,7 A, 0,9 A, dan 1,14 A. pemberian beban pada ICE mempunyai batasan maksimal yaitu 1,14 A pada rem elektromagnetik. Pada simulasi ini ICE diberikan sinyal masukan berupa sinyal *step* sebesar 1448 RPM.

a. Pengujian Dengan Arus Beban 0,7 A

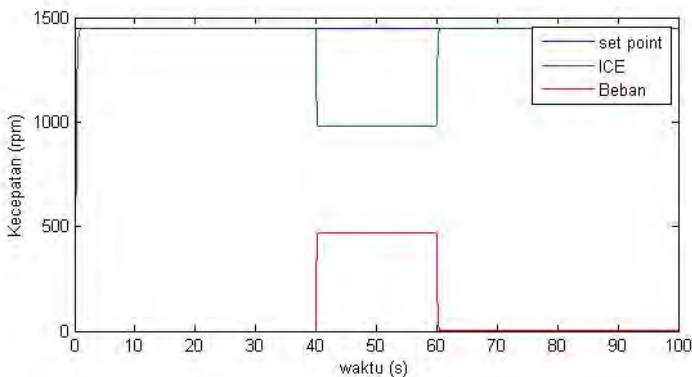
Pada pengujian ini dengan arus beban sebesar 0,7 A terlihat penurunan kecepatan dari 1448 RPM menjadi 1209 RPM. Pemberian beban rem elektromagnetik pada ICE menggunakan *Signal Builer* dimana beban diberikan pada selang waktu tertentu yaitu antara waktu 40 detik sampai dengan 60 detik. Respon dari ICE dan beban saat kondisi arus beban sebesar 0,7 A dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Respon ICE dan beban pada arus beban 0,7 A

b. Pengujian Dengan Arus Beban 0,9 A

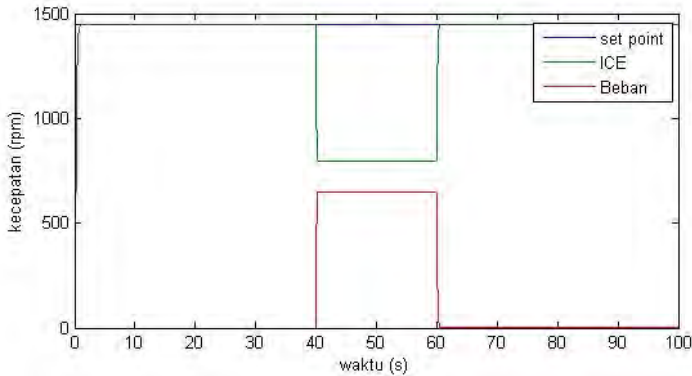
Pada pengujian arus beban 0,9 A penurunan kecepatan menjadi 980 RPM, yaitu sebesar 468 RPM. Pemberian beban sama seperti pengujian pada arus beban 0,7 yaitu pada waktu 40 detik sampai dengan 60 detik. Respon dari ICE dan beban saat kondisi arus beban sebesar 0,9 A dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Respon ICE dan beban pada arus beban 0,9A

c. Pengujian Dengan Arus Beban 1,14 A

Pengujian dengan arus beban maksimal yaitu 1,14 A menyebabkan penurunan kecepatan sebesar 648 RPM menjadi 800 RPM. Pengujian kondisi pembebanan ini juga sama seperti pengujian pada arus beban 0,7 A yaitu pada waktu 40 detik sampai dengan 60 detik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.3.



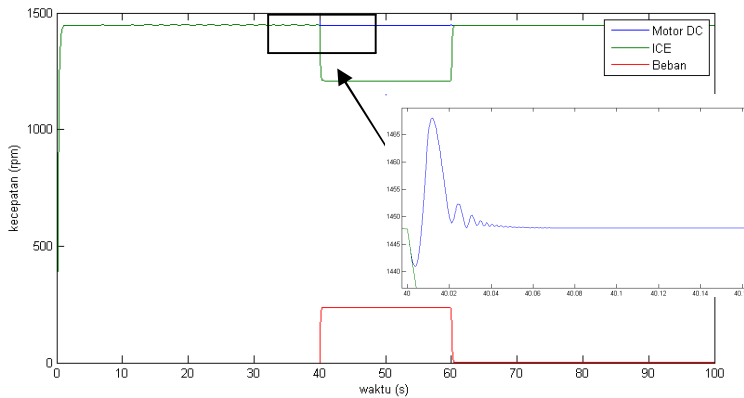
Gambar 4.3 Respon ICE dan beban pada arus beban 1,14A

4.2.2 Simulasi ICE Kondisi Beban Nominal Dengan Bantuan Motor DC Menggunakan Kontroler PI-Robust

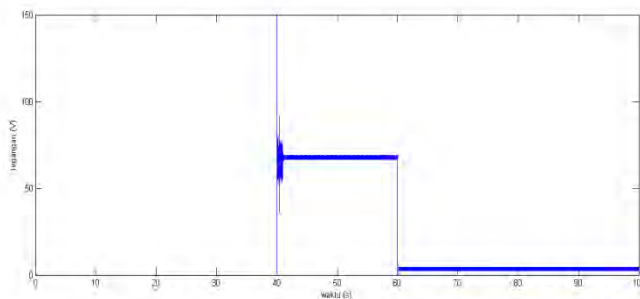
Simulasi ini bertujuan untuk melihat respon ICE dengan bantuan motor DC saat kondisi pembebanan. Beban yang diberikan sama dengan pengujian ICE kondisi beban nominal tanpa bantuan motor DC yaitu 0,7A, 0,9A, dan 1,14A. Simulasi ini juga bertujuan untuk melihat fungsi dari motor DC dengan kontroler PI-Robust dalam memberikan bantuan untuk ICE tetap pada kondisi yang diinginkan walau dalam kondisi pembebanan.

a. Pengujian Dengan Arus Beban 0,7 A

Pada pengujian ini penurunan kecepatan ICE sebesar 239 RPM. Pada pengujian ini motor DC dengan kontroler PI-Robust dapat membantu ICE untuk mempertahankan *setpoint* yang ditetapkan diawal yaitu 1448 RPM. Respon dari HEV dan sinyal kontrol saat kondisi arus beban sebesar 0,7 A dapat dilihat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5.



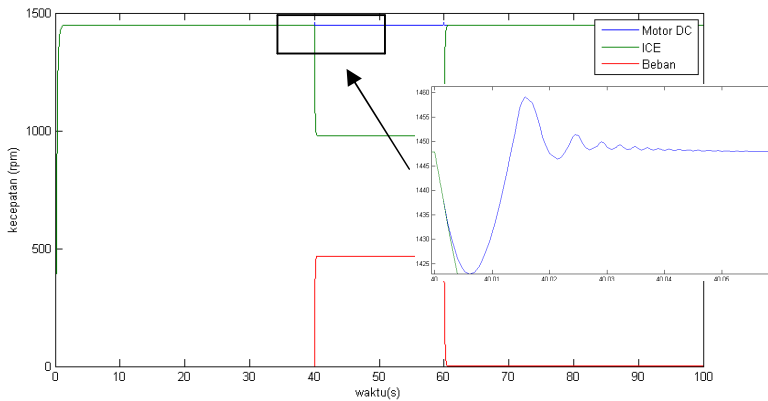
Gambar 4.4 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 0,7A



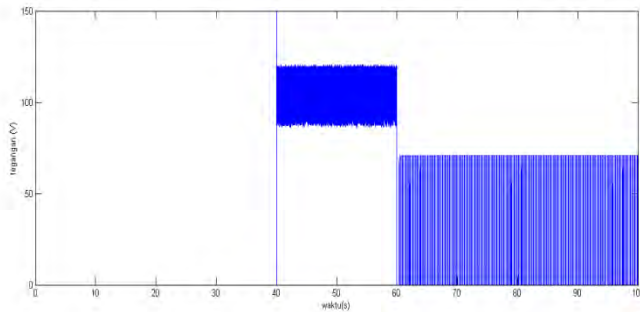
Gambar 4.5 Sinyal kontrol pada arus beban 0,7

b. Pengujian Dengan Arus Beban 0,9 A

Pada pengujian kedua dengan arus beban 0,9 A, penurunan kecepatan sebesar 468 RPM. Motor DC dengan kontroler PI-Robust dapat membantu ICE dalam mempertahankan *setpoint* di 1448 RPM. Respon dari HEV dan sinyal kontrol saat kondisi arus beban sebesar 0,9 A dapat dilihat pada gambar 4.6 dan gambar 4.7.



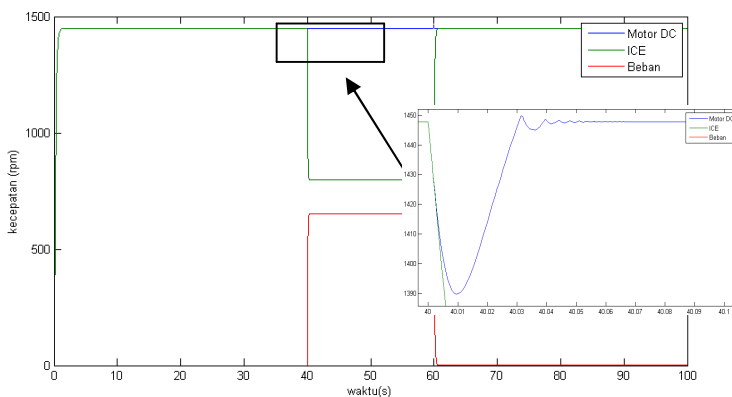
Gambar 4.6 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 0,9A



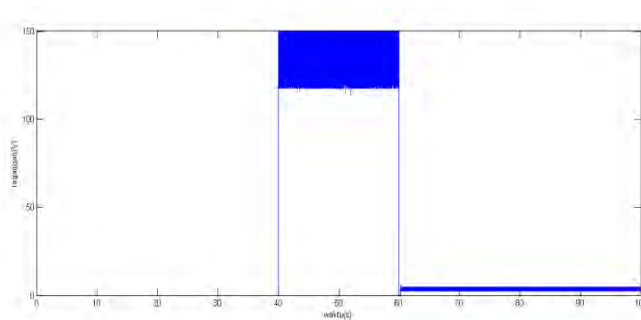
Gambar 4.7 Sinyal kontrol pada arus beban 0,9 A

c. Pengujian Dengan Arus Beban 1,14 A

Pengujian dengan arus beban maksimal menurunkan kecepatan ICE sebesar 648 RPM. Pada arus beban maksimal ini motor DC dapat membantu ICE dalam mempertahankan *setpoint* yaitu 1448 RPM. Respon dari HEV dan sinyal kontrol saat kondisi arus beban sebesar 1,14 A dapat dilihat pada gambar 4.8 dan gambar 4.9.



Gambar 4.8 Respon motor DC dengan kontroler PI-Robust saat arus beban 1,14A



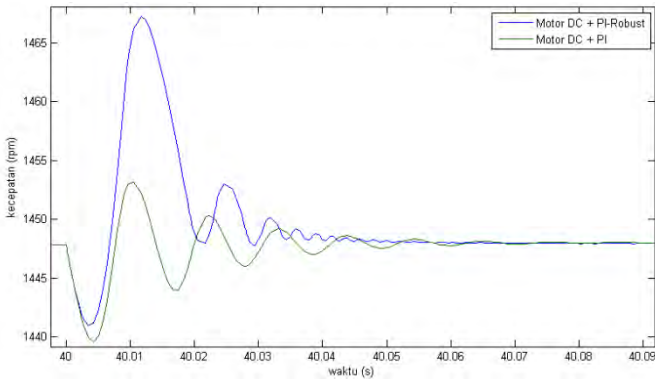
Gambar 4.9 Sinyal kontrol pada arus beban 1,14 A

4.2.3 Perbandingan Respon Kontroler PI-Robust dan Kontroler PI Saat Kondisi Awal Pembebanan

Perbandingan kondisi pembebanan dengan menggunakan kontroler PI-Robust dan kontroler PI bertujuan untuk mengetahui respon motor DC pada saat kondisi awal pembebanan yaitu pada detik ke empat puluh. Beban yang diberikan sama dengan pengujian ICE kondisi beban nominal tanpa bantuan motor DC yaitu 0,7A, 0,9A, dan 1,14A.

a. Perbandingan Dengan Arus Beban 0,7A

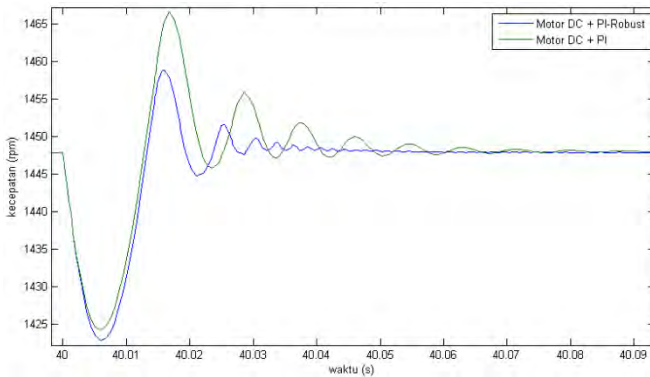
Pada kondisi beban 0,7 A, motor DC dengan kontroler PI-Robust mengalami *overshoot* lebih tinggi dibandingkan dengan motor DC dengan kontroler PI. Osilasi pada kondisi awal pembebanan untuk motor DC dengan kontroler PI-Robust berosilasi diatas nilai *setpoint* yaitu 1448 RPM, sedangkan untuk motor DC dengan kontroler PI berosilasi di sekitar nilai *setpoint*. Masing-masing kontroler mencapai keadaan stabil pada detik ke 40,07. Hal ini bisa dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Perbandingan kontroler pada arus beban 0,7 A

b. Perbandingan Dengan Arus Beban 0,9A

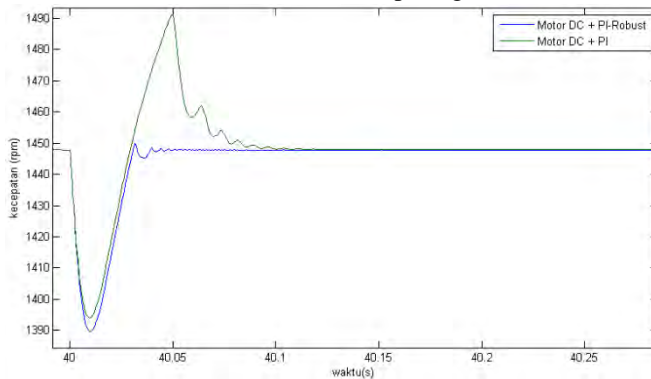
Pada kondisi beban 0,9 A, motor DC dengan kontroler PI mengalami *overshoot* lebih tinggi dibandingkan dengan motor DC dengan kontroler PI-Robust. Kedua respon kontroler berosilasi diatas nilai *setpoint* di 1448 RPM dengan frekuensi osilasi motor DC dengan kontroler PI lebih besar dibandingkan dengan osilasi motor DC dengan kontroler PI-Robust. Masing-masing kontroler mencapai keadaan stabil pada detik ke 40,09. Hal ini bisa dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Perbandingan kontroler pada arus beban 0,9 A

c. Perbandingan Dengan Arus Beban 1,14A

Pada kondisi beban 0,7 A, motor DC dengan kontroler PI-Robust mengalami *overshoot* sangat tinggi mencapai 1490 RPM dimana nilai *setpoint* yaitu 1448 RPM. Sedangkan motor DC dengan kontroler PI-Robust mengalami overshoot sangat kecil. Masing-masing kontroler mencapai keadaan stabil pada detik ke 40,1. Hal ini bisa dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Perbandingan kontroler pada arus beban 1,14 A

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, didapatkan kesimpulan bahwa kontroler PI-Robust yang sudah dirancang dapat membantu ICE dalam mempertahankan kecepatan dari *setpoint* pada saat kondisi beban melebihi beban nominal

Motor DC dalam membantu ICE mempertahankan *setpoint* membutuhkan waktu kurang dari satu detik dalam mengurangi efek pembebanan yang diberikan oleh rem elektromagnetik sehingga ICE dalam waktu singkat dapat kembali menuju *setpoint* yang diinginkan

Penentuan kompensator dalam kontroler PI-Robust cukup memasukkan nilai K, dimana diagram bode G_c hanya mempunyai penurunan dan kenaikan nilai sebesar 0,4 dB sehingga menyerupai diagram bode dari K. Kompensator pada kontroler PI-Robust dapat mengurangi sinyal *error* yang dialami oleh ICE.

Pada hasil perbandingan kontroler PI-Robust dan kontroler PI dapat diambil kesimpulan untuk pembebanan dengan arus kecil cukup menggunakan kontroler PI dalam sistem kontrolnya, sedangkan untuk arus beban besar sampai maksimal menggunakan kontroler PI-Robust dalam sistem kontrolnya. Hal ini mengacu pada respon dari *overshoot* respon dan *error steadystate* dari respon sistemnya.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut, apabila diagram bode G_c mempunyai penurunan dan kenaikan magnitude yang besar dapat menggunakan kompensator orde-n. Untuk pengontrolan beban dengan arus nominal dan kecil cukup menggunakan kontroler PI, sedangkan untuk arus beban besar dan maksimal disarankan menggunakan kontroler PI-Robust. Dan disarankan untuk menambahkan kontroler *derivative* sebagai kontrol untuk model menghilangkan *overshoot* pada respon sistem.

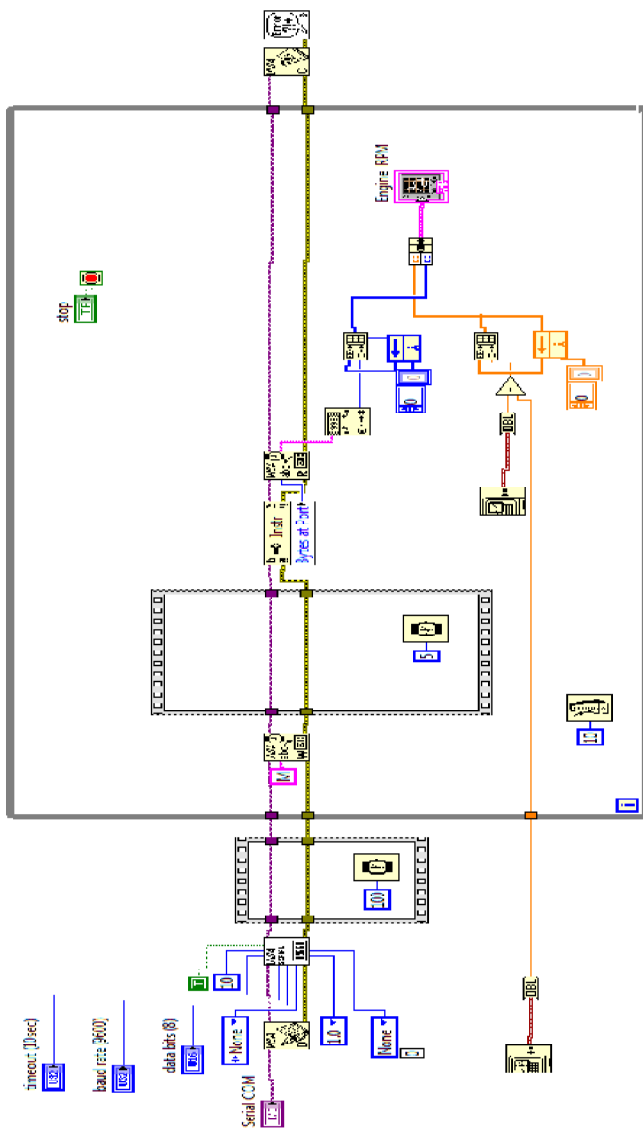
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

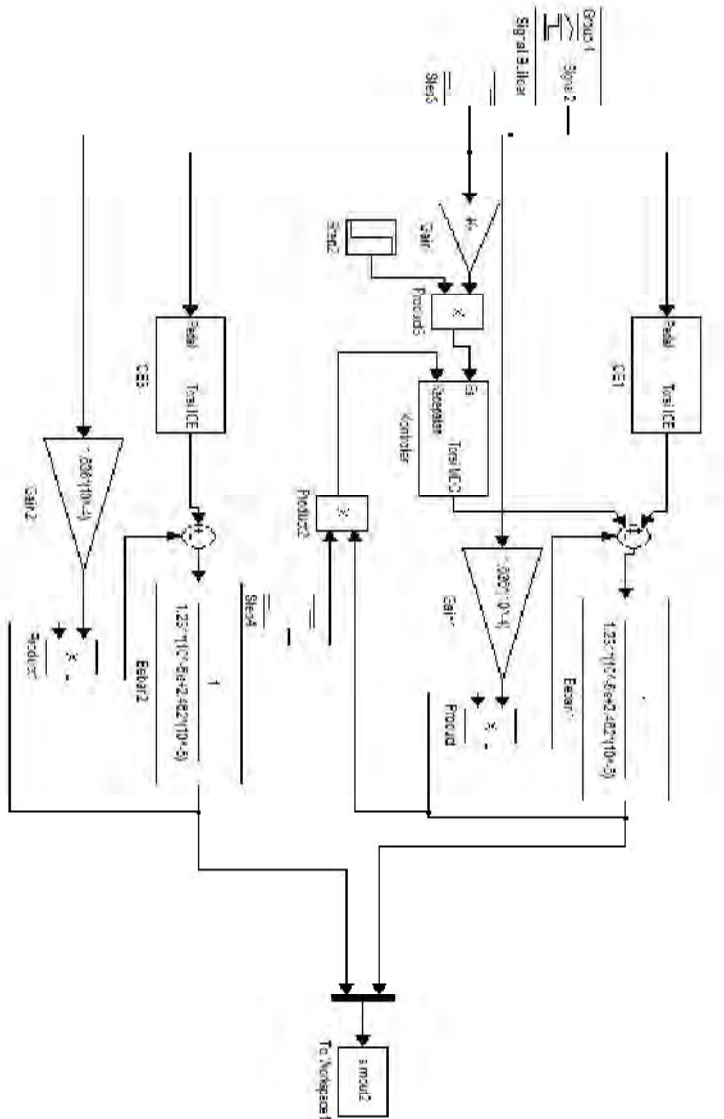
- [1] B. P. Wibowo, *Traction Control pada Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV) dengan Menggunakan Metode Kontrol Neuro-Fuzzy Prediktif*, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro ITS, 2014.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay and A. Emadi, "Hybrid Electric Vehicle," in *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle*, Florida, CRC Press, 2005, pp. 117-136.
- [3] A. Pudjanarsa and D. Nursuhud, *Mesin Konversi Energi*, Yogyakarta: Andi Offset, 2008.
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay and A. Emadi, "DC Motor Drives," in *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, Florida, CRC Press, 2005, pp. 142-146.
- [5] N. Gamayanti, *Diktat Kuliah Dasar Sistem Pengaturan*, Surabaya: ITS, 2012.
- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall Inc, 1970.
- [7] Bao-quan, KOU, "Control of Hybrid Direct-drive Motor Using Non-linear Nominal Model Tracking Method", China, Teaching and Research Section of Electric Motor, HIT, 2004.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

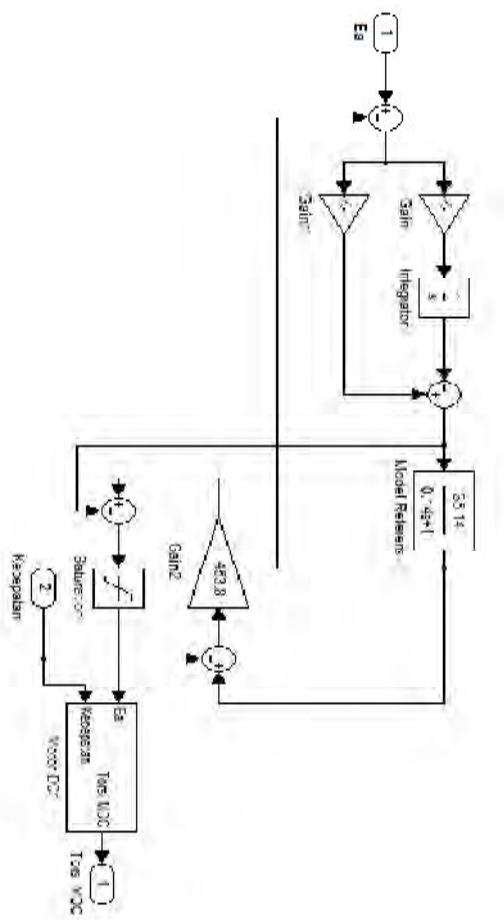
A. Blok LabView untuk identifikasi statis



B. Blok simulink simulasi sistem HEV



C. Blok simulasi kontroler PI-Robust



D. Program arduino

```
//Pin dari encoder menuju arduino
#define encoder 3
unsigned long t;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(encoder, INPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  if (Serial.available())
  {
    delay(1);
    if (Serial.read() == 'M')
    {
      while (Serial.available())
      {
        Serial.read();
      }
      unsigned long waktu = pulseIn(encoder, HIGH);
      float jeda = waktu;
      jeda = jeda / 1000000;
      float kecepatan = (1 / (jeda * 72)) * 60;
      float y = 229.9536927+(0.680455391*kecepatan);
      word RPM = y;
      Serial.print(RPM);
    }
  }
}
```

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Sentosa Sondang Oktovius. Lahir di kota Bekasi pada tanggal 20 Oktober 1992 dan merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Sunggul Saragih dan Suhermi. Setelah lulus dari SMAN 8 Jakarta pada tahun 2011, penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Jurusan Teknik Elektro dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Pengaturan. Pada tahun kedua dan ketiga penulis aktif sebagai organisasi dan kepanitiaan di lingkungan kampus. Pada tahun ketiga dan keempat penulis aktif sebagai anggota dari Tim Robotika ITS. Selain aktif pada bidang organisasi dan bidang lomba, penulis juga aktif sebagai pemain futsal Tim Elektro pada tahun pertama sampai tahun ketiga. Penulis berharap dengan selesainya pengerjaan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat pada penelitian dan perkembangan teknologi selanjutnya, khususnya dibidang Teknik Sistem Pengaturan.